

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CAMPUS ITAJAÍ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUIZ VINICIUS COSTA OLIVEIRA

**SISTEMA DE GERAÇÃO SOLAR COM USO DE REFLETOR PARA
AUMENTO DE EFICIÊNCIA**

ITAJAÍ, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS ITAJAÍ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUIZ VINICIUS COSTA OLIVEIRA

**SISTEMA DE GERAÇÃO SOLAR COM USO DE REFLETOR PARA
AUMENTO DE EFICIÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte dos
requisitos para obtenção do título de
engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Msc. Marcelo dos Santos Coutinho

ITAJAÍ, 2023.

Ficha de identificação da obra
Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC - Campus Itajaí

O48s Oliveira, Luiz Vinicius Costa
Sistema de geração solar com uso de refletor para aumento de eficiência /
Luiz Vinicius Costa Oliveira ; orientador: Marcelo dos Santos Coutinho. --
2023.
82 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Itajaí,
Graduação em Engenharia Elétrica, Itajaí, 2023.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica. 2. Energia solar. 3. Sistemas de energia fotovoltaica -
Brasil. I. Coutinho, Marcelo dos Santos. II. Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – Graduação em Engenharia Elétrica.
III. Título.

CDD 621.47

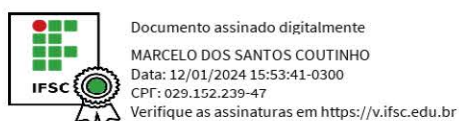
SISTEMA DE GERAÇÃO SOLAR COM USO DE REFLETOR PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA

LUIZ VINICIUS COSTA OLIVEIRA

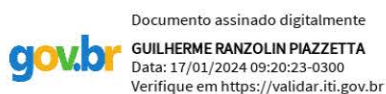
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Itajaí, 18 de dezembro, 2023.

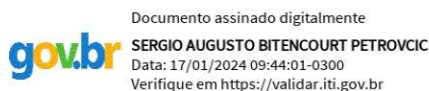
Banca Examinadora:



Marcelo dos Santos Coutinho, Msc.
Instituto Federal de Santa Catarina



Guilherme Ranzolin Piazzetta, Msc.
Instituto Federal de Santa Catarina



Sérgio Augusto Bitencourt Petrovcic, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais por todo o seu apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o seu apoio durante o desenvolvimento deste trabalho e, também, durante toda a graduação. Agradeço também ao meu orientador por todas as ideias, palavras e conselhos que me guiaram e muito me ensinaram por todo o percurso deste projeto.

Até a escuridão tem que passar. Um novo dia virá. E, quando o sol brilhar, brilhará
mais forte

(John Ronald Reuel Tolkien, 1955)

RESUMO

O uso de refletores na geração solar fotovoltaica é uma opção para compensar a eficiência das células e aumentar a potência que pode ser extraída de módulos. O ângulo de inclinação do refletor tem um efeito direto sobre o funcionamento do refletor e um ajuste adequado de seu valor pode aumentar o ganho de potência do uso do refletor e assim melhorar a eficiência do sistema. Neste trabalho, duas propostas de uso do ajuste automático do ângulo de inclinação de um refletor aplicado a um sistema de geração fotovoltaica são estudadas e testadas, uma sendo o controle indireto da temperatura de um arranjo fotovoltaico de dois módulos e a outra um rastreador que busca o melhor ângulo de inclinação em relação ao ângulo de incidência da luz, com objetivo de verificar sua viabilidade, considerando o ganho ocasionado pelo ajuste e as perdas energéticas decorrentes do sistema mecânico. Por fim, os experimentos realizados mostraram que o controle indireto da temperatura não é uma ideia viável e que o rastreador mostrou um ganho de potência, porém considerando o arranjo fotovoltaico e sistema mecânico utilizados e para as condições ambientais do estudo, esse ganho não compensou as perdas energéticas devido ao funcionamento do sistema mecânico do rastreador.

Palavras-chave: Painéis fotovoltaicos, módulos fotovoltaicos, refletores solares, eficiência energética.

ABSTRACT

The use of reflectors in photovoltaic solar power generation is an option to compensate the low efficiency of photovoltaic cells and to increase the power output which can be extracted from solar panels. The slope angle of the reflector has a direct effect over how the reflector works and its adequate adjustment can increase the power gain caused by the use of the reflector. In this work, two proposals of automatic adjustment of the slope angle applied to a photovoltaic generation system are studied and tested, one being an indirect control of the temperature of the solar panel and the other being a tracker which seeks the best slope angle according to the angle of incidence of light. The study aims to verify if the proposals are viable, considering the output gain and the losses due to the mechanical system. The experiments made showed that the indirect temperature control is not viable and that the tracker caused an output gain, however, it wasn't viable given the solar panel and mechanical system used and the environmental conditions of the study, due to the energy losses of the mechanical system.

Keywords: Photovoltaic panels, solar reflectors, angle control, efficiency.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Representação da reflexão e refração | 23 |
| Figura 2 – Representação do uso de refletores | 24 |
| Figura 3 – Representação do sistema | 25 |
| Figura 4 – Análise do alcance dos raios refletidos | 26 |
| Figura 5 – Camadas de uma célula FV | 29 |
| Figura 6 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica | 30 |
| Figura 7 – Curvas características de células fotovoltaicas | 31 |
| Figura 8 – Representação do algoritmo <i>hill-climbing</i> | 33 |
| Figura 9 – Módulo fotovoltaico KM (P) 10 | 38 |
| Figura 10 – Estrutura com o refletor e o arranjo fotovoltaico | 39 |
| Figura 11 – Carga configurável | 40 |
| Figura 12 – Ligação do circuito de medição de tensão | 41 |
| Figura 13 – Ligação do circuito de medição de corrente | 42 |
| Figura 14 – Ligação do circuito de medição de iluminância | 43 |
| Figura 15 – Ligação do circuito de medição de temperatura | 43 |
| Figura 16 – Ligação do circuito de medição de ângulo | 44 |
| Figura 17 – Motor de passo | 45 |
| Figura 18 – Sistema mecânico | 46 |
| Figura 19 – Primeira luminária | 47 |
| Figura 20 – Segunda luminária | 48 |
| Figura 21 – Laboratório de sistemas de potência lação | 49 |
| Figura 22 – Laboratório de projetos elétricos | 53 |
| Figura 23 – Fluxograma do algoritmo | 55 |
| Figura 24 – Curvas de potência por tensão para os dois casos | 59 |
| Figura 25 – Curvas de corrente por tensão para os dois casos | 60 |
| Figura 26 – Curvas de temperatura para os dois casos | 61 |
| Figura 27 – V_{ca} x I_{cc} em função da temperatura | 62 |
| Figura 28 – Comparação entre curvas de potência por tempo reais e estimadas | 63 |
| Figura 29 – Curva iluminância em relação ao ângulo | 64 |
| Figura 30 – Curvas de temperatura do arranjo com o refletor fixo no ângulo ótimo e com o controle manual | 66 |

| | |
|---|----|
| Figura 31 – Comparação de V_{ca} x I_{cc} entre o refletor fixo no ângulo ótimo e na tentativa de controle manual | 66 |
| Figura 32 – Curvas de V_{ca} x I_{cc} em função do ângulo de incidência para ambos os experimentos | 67 |
| Figura 33 – Ângulo ótimo pelo ângulo de incidência | 68 |
| Figura 34 – Comportamento da corrente I_{cc} durante os ensaios | 69 |
| Figura 35 – Curvas de V_{ca} x I_{cc} com rastreamento e sem uso do refletor | 70 |
| Figura 36 – Curva de V_{ca} x I_{cc} com rastreamento considerando perdas do motor | 71 |
| Figura 37 – Curvas de energia gerada | 72 |
| Figura 38 – Carta solar | 73 |
| Figura 39 – Curvas de potência estimadas | 73 |
| Figura 40 – Curvas de energias geradas estimadas | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Coeficientes de perda calculados | 63 |
| Tabela 2 – Potências e ganhos por ângulo de inclinação | 64 |
| Tabela 3 – Potências e ganhos por ângulo de inclinação | 68 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|------------|----|
| Equação 01 | 21 |
| Equação 02 | 21 |
| Equação 03 | 22 |
| Equação 04 | 22 |
| Equação 05 | 24 |
| Equação 06 | 25 |
| Equação 07 | 26 |
| Equação 08 | 26 |

| | |
|------------|----|
| Equação 09 | 27 |
| Equação 10 | 27 |
| Equação 11 | 27 |
| Equação 12 | 28 |
| Equação 13 | 28 |
| Equação 14 | 28 |
| Equação 15 | 30 |
| Equação 16 | 30 |
| Equação 17 | 32 |
| Equação 18 | 62 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

FV - Fotovoltaico(s)

LDR – *Light-dependent resistor*

Vca – Tensão de circuito aberto

Icc – Corrente de curto circuito

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω – Ohm

θ_1 – Ângulo de incidência da luz na lei da reflexão e na lei de Snell

θ_2 – Ângulo de refração da luz na lei da reflexão na lei de Snell

α – Ângulo de incidência da luz solar no sistema de geração fotovoltaico

θ – Ângulo de inclinação do refletor no sistema de geração fotovoltaico

θ_{otm} – Ângulo de inclinação do refletor ótimo

k_b – Constante de Boltzmann

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Justificativa | 19 |
| 1.2 | Definição do Problema | 19 |
| 1.3 | Objetivo Geral | 20 |
| 1.4 | Objetivos Específicos | 20 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 2.1 | Tensão, Corrente e Potência Elétrica | 21 |
| 2.2 | Ótica | 22 |
| 2.2.1 | Aplicação de Refletores | 24 |
| 2.3 | Geração Fotovoltaica | 28 |
| 2.3.1 | Princípio de Funcionamento | 28 |
| 2.3.2 | Características e Parâmetros Elétricos | 30 |
| 2.4 | Algoritmo <i>Hill-climbing</i> | 32 |
| 2.5 | Revisão de Literatura | 34 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 37 |
| 3.1 | Materiais | 37 |
| 3.1.1 | Módulos fotovoltaicos KM (P) 10 | 37 |
| 3.1.2 | Refletor | 39 |
| 3.1.3 | Estrutura De Suporte | 39 |
| 3.1.4 | Carga XL20DE04.14 | 40 |
| 3.1.5 | Arduino Uno | 40 |
| 3.1.6 | Circuito De Medição De Tensão | 40 |
| 3.1.7 | Circuito De Medição De Corrente | 41 |
| 3.1.8 | Circuito De Medição De Iluminância | 42 |
| 3.1.9 | Circuito De Medição De Temperatura | 43 |
| 3.1.10 | Circuito De Medição De Ângulo | 44 |
| 3.1.11 | Motor De Passo JK42HS40-1004AC | 44 |
| 3.1.12 | Sistema Mecânico | 45 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.1.13 | Luminárias E Lâmpadas | 46 |
| 3.2 | Métodos | 48 |
| 3.2.1 | Testes Iniciais E Levantamento De Dados Do Arranjo | 48 |
| 3.2.2 | Investigação Do Aumento de Eficiência Por Controle Indireto Da Temperatura | 50 |
| 3.2.2.1 | <i>Tentativa De Controle Manual</i> | 51 |
| 3.2.3 | Investigação Do Aumento de Eficiência Por Rastreo De Ângulo Ótimo | 52 |
| 3.2.3.1 | <i>Implementação Do Rastreador</i> | 54 |
| 3.2.3.2 | <i>Estimativa do sistema ao longo de um dia</i> | 57 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 59 |
| 4.1 | Curvas De Potência Por Tensão E Corrente Por Tensão | 59 |
| 4.2 | Investigação Do Aumento de Eficiência Por Controle Indireto Da Temperatura | 60 |
| 4.2.1 | Controle Manual | 65 |
| 4.3 | Investigação Do Aumento de Eficiência Por Rastreo De Ângulo Ótimo | 67 |
| 4.3.1 | Rastreador De Ângulo Ótimo | 69 |
| 4.3.2 | Estimativa do sistema ao longo do dia | 72 |
| 5 | CONCLUSÃO | 75 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 77 |

1 INTRODUÇÃO

A solução da crise ambiental é um dos desafios do século XXI. Uma das principais causas deste problema é a emissão de gases poluentes, que agrava o efeito estufa, aquecendo o planeta e provocando mudanças climáticas (PINSKY, 2021).

Segundo a Unep (2021), as temperaturas do ano de 2020 foram, em média, 1,2 °C mais quentes que as do ano de 1880 e a concentração de CO₂ atingiu uma alta histórica e os efeitos destas mudanças já podem ser sentidos, por exemplo nos ciclos de chuvas e aumento da frequência de secas e queimadas (MCGRATH, 2021).

O uso de usinas termelétricas é um dos responsáveis pela queima de combustíveis fósseis e consequente emissão de gases do efeito estufa. Segundo dados da Our World in Data (RITCHIE, 2020), a emissão de gases estufa para geração de eletricidade representa 17,5 %, pouco mais de um oitavo, de toda emissão desses gases no mundo.

Além da questão ambiental, há também a questão do custo elevado para geração nestas usinas, como evidenciado na crise energética ocorrida no Brasil em 2021 por consequência de uma estiagem que prejudicou as usinas hidrelétricas (NASSIF, 2021). O uso de termelétricas para suprir a demanda de energia resultou em um grande aumento nos valores das tarifas em todo o território nacional (SANT'ANNA, 2021).

Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (2022), houve um aumento de 43,85% na produção média de energia por usinas termelétricas do primeiro semestre de 2021 para o segundo semestre do mesmo ano. Além disso, um estudo do Instituto de Energia e Meio Ambiente mostrou um aumento de 121 % nas emissões de CO₂ em 2021 pelo uso destas usinas (SANDRI; BARRETO, 2021).

Diante deste cenário, vê-se a necessidade de tornar a matriz energética nacional mais robusta pela busca e adoção de fontes de energia que sejam sustentáveis e que tenham custo menor ou igual ao de usinas hidrelétricas, em outras palavras, diversificar a matriz energética brasileira com fontes de energia renováveis.

Já houve um aumento na adoção destas fontes em escala global nas últimas décadas devido à preocupação ambiental e os avanços tecnológicos nesta área (REN21, 2015). Dentre as muitas fontes renováveis, uma das que mais cresceu foi a geração de energia solar fotovoltaica (REN21, 2015).

A expansão desta fonte se deu por uma combinação de incentivos governamentais e avanços tecnológicos e produtivos que reduziram o custo de módulos fotovoltaicos e tornaram esta fonte atrativa aos consumidores finais (ROHWER-KAHLMANN, 2021). No caso nacional, houve também o incentivo devido ao aumento do custo da energia elétrica durante a estiagem, impulsionando o setor de instalação de módulos fotovoltaicas para empresas e residências (RESENDE, 2021).

Um dos focos de pesquisa na área de geração de energia solar fotovoltaica é a melhoria da eficiência do processo de conversão de energia luminosa em energia elétrica, cujos valores em módulos comerciais ficam em torno de 15 e 20 % (UNIVERSIDADE DE MICHIGAN, 2021).

Pesquisas atuais seguem várias possibilidades, tais como uso de novos materiais e rastreamento solar. Uma das vias estudadas é o uso de refletores e concentradores para aumentar a radiação sobre um mesmo módulo fotovoltaico, visando compensar a eficiência com um material de custo baixo se comparado ao utilizado nas células.

Refletores solares são definidos como superfícies planas ou curvas, retangulares ou de outros formatos, que apresentam alta refletividade, de tal forma que eles redirecionam para os módulos fotovoltaicos os raios luminosos do sol que atingem sua superfície. Esta será a definição que este presente trabalho utilizará no restante do texto.

Há diversos trabalhos nesta linha de pesquisa, realizando experimentos que focam em avaliar os efeitos dos refletores sobre a geração em diferentes situações, tais como diferentes materiais reflexivos, formatos do refletor, ângulos em relação ao módulo ou o número de refletores usados, e comparando os resultados obtidos com outras técnicas, em especial rastreamento solar.

Este trabalho visa estudar e avaliar a aplicabilidade do uso do ajuste automático do ângulo de inclinação do refletor como forma de aumentar o rendimento desta técnica ao se buscar a posição ótima do refletor para maximizar a geração de potência. Em particular, serão exploradas duas possibilidades de como este ajuste poderia melhorar o ganho de potência proporcionado pelo refletor, que são o controle indireto da temperatura e o rastreamento do ângulo de inclinação de acordo com o ângulo de incidência da luz solar.

Na primeira proposta, o ajuste do ângulo buscaria contornar o aumento da temperatura do módulo ocasionado pelo uso do refletor, o qual é um dos problemas de seu uso. Assim, o estudo buscará entender se a relação entre ângulo de inclinação, ganho de potência proporcionado pelo refletor e perda pelo aumento de temperatura é tal que seja possível encontrar um ponto ótimo que maximize o desempenho por minimizar as perdas.

Já a segunda proposta é o estudo da viabilidade de um sistema rastreador, que move o refletor de acordo com o ângulo de incidência da luz solar, buscando a inclinação do refletor em que há o maior ganho na geração de energia pelo módulo fotovoltaico, de forma a otimizar a eficácia do uso do refletor.

Este sistema seria uma alternativa a rastreadores tradicionais, em que o módulo fotovoltaico é movido angularmente de forma a sempre estar perpendicular ao sol, podendo ser útil em situações em que este movimento não é possível, tais como telhados de residências.

1.1 Justificativa

O uso de refletores na energia solar fotovoltaica possibilita aumentar a potência que pode ser extraída de um mesmo módulo fotovoltaico com tecnologia e materiais de baixo custo e o ajuste do ângulo de inclinação poderia ser usado para otimizar esta técnica e aumentar a eficácia do uso de refletores.

1.2 Definição do Problema

Estudar se o ajuste do ângulo de inclinação de refletores aplicados na geração fotovoltaica é uma técnica viável para melhorar o desempenho final do sistema de geração

1.3 Objetivo Geral

Estudar a viabilidade e desempenho de um módulo fotovoltaico com um sistema de refletores de ângulo em relação ao módulo em duas possibilidades, no controle indireto da temperatura e como um rastreador do ângulo de maior ganho do refletor.

1.4 Objetivos Específicos

- Projetar e construir a estrutura mecânica e o sistema de controle
- Entender o funcionamento físico do sistema por meio de experimentos e de modelagem matemática
- Projetar e implementar um protótipo para realização das medições de desempenho
- Realizar as medições para a análise de desempenho das duas propostas
- Implementar um sistema de controle em caso de proposta viável
- Calcular os custos energéticos dos sistemas automatizados e avaliar a viabilidade considerando estas perdas

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se no conhecimento existente acerca dos fenômenos físicos mais importantes para o escopo deste estudo, isto é, a análise de circuitos elétricos, ótica, na teoria de algoritmos de busca e otimização *hill climbing*, e na literatura de estudos semelhantes que foi produzida até então.

2.1 Tensão, Corrente e Potência Elétrica

O eletromagnetismo é fundamentado no conceito de carga elétrica. Cargas elétricas se dividem em positivas e negativas, que se relacionam de tal forma que cargas iguais se repelem, enquanto cargas opostas se (NILSSON; RIEDEL, 2015).

Tensão elétrica é definida como a energia necessária ou gasta para mover uma unidade de carga elétrica de um ponto a outro no espaço (NILSSON; RIEDEL, 2015). Ela surge quando há a separação de cargas, o que produz um campo elétrico que, por si, produz uma força de tal modo que energia é gasta para realizar ou desfazer esta separação (NILSSON; RIEDEL, 2015).

Matematicamente, a tensão é definida pela equação:

$$v(t) = \frac{dw(t)}{dq} [J/C] \quad (01)$$

Corrente elétrica é definida como o movimento ordenado de cargas elétricas e seu valor é a intensidade deste movimento, isto é, quantas cargas passam por uma área transversal ao movimento por unidade de tempo (NILSSON; RIEDEL, 2015).

Matematicamente:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} [A] \quad (02)$$

Este movimento é responsável pelo surgimento de um campo magnético, cuja forma e intensidade depende diretamente deste movimento (NILSSON; RIEDEL, 2015).

Potência elétrica é a energia gerada ou consumida pelos elementos de um circuito elétrico por unidade de tempo (NILSSON; RIEDEL, 2015). A definição de potência em termos matemáticos é dada pela equação:

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} [J/s] \quad (03)$$

Analisando as definições destas três grandezas, vê-se que é possível relacioná-las matematicamente e que a potência elétrica produzida ou gasta por um elemento de um circuito elétrico nada mais é que o produto da tensão sobre seus terminais e da corrente que flui por eles (NILSSON; RIEDEL, 2015). Ou seja:

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = \frac{dW(t)}{dq} \cdot \frac{dq(t)}{dt} = v \cdot i \quad (04)$$

No sistema internacional de medidas, a unidade da carga elétrica é o coulomb, definido como ampère segundo, a unidade da tensão elétrica é joules por coulomb, denominado de volt, a unidade da corrente é o ampère, e a unidade da potência é o watt, que é o mesmo que joules por segundo.

2.2 Óptica

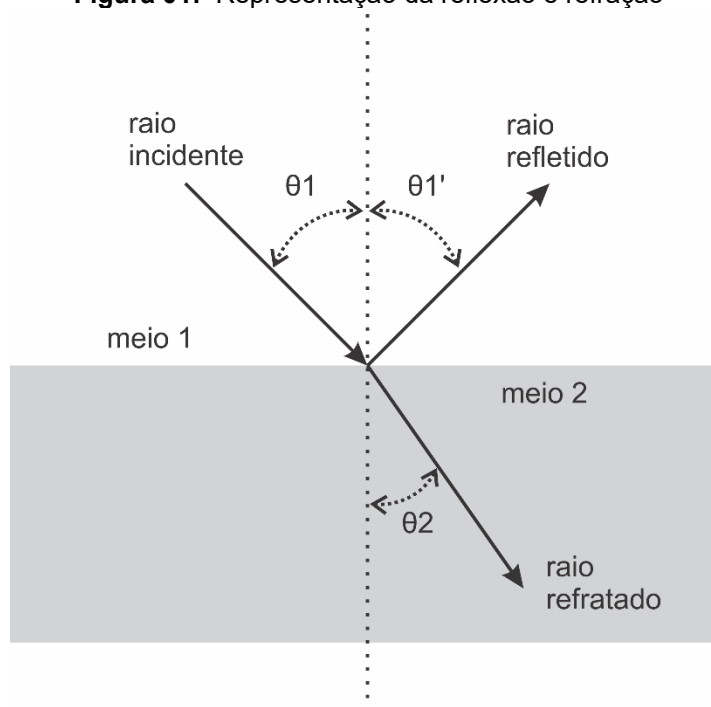
Óptica é o estudo do comportamento da luz e de suas propriedades (YOUNG; FREEDMAN, 2012). A luz é uma forma de onda eletromagnética e é parte do espectro eletromagnético, porém apresenta um comportamento dúbio em que certos comportamentos demonstram uma natureza ondulatória e outros uma natureza corpuscular, em que a luz é composta de partículas, chamadas fótons e o entendimento moderno da luz se utiliza das duas abordagens (YOUNG; FREEDMAN, 2012).

Para ambas as abordagens, o modelo mais simples que pode ser usado para representar e entender os fenômenos luminosos é o modelo de raios, em que a luz é entendida como composta de raios, linhas retas perpendiculares às frentes de ondas

e paralelas à trajetória da luz (YOUNG; FREEDMAN, 2012). O modelo de raios também é a base para o modelo de estudo e entendimento dos fenômenos luminosos conhecido como ótica geométrica (YOUNG; FREEDMAN, 2012).

Os dois comportamentos mais elementares e mais importantes da luz são a reflexão e a refração e que são facilmente entendidos utilizando o modelo de raios (YOUNG; FREEDMAN, 2012). Na interface entre dois meios de propagação, parte da luz inverte seu sentido e retorna ao meio inicial, o que é chamado de reflexão, e parte é absorvida pelo novo meio e se propaga por ele, o que é chamado de refração.

Figura 01: Representação da reflexão e refração



Fonte: Autor.

A lei da reflexão dita que o ângulo entre a luz incidente (θ_1) e o eixo normal ao plano de incidência e o ângulo entre a luz refletida e este mesmo eixo têm o mesmo valor, independentemente dos materiais de ambos os meios da interface (YOUNG; FREEDMAN, 2012).

Já a refração é regida pela lei de Snell, representada pela Equação 05, que diz que a razão dos senos dos ângulos entre a luz incidente e a luz refratada com o eixo normal ao plano de incidência são proporcionais à razão inversa dos índices de refração de onde ocorrem (YOUNG; FREEDMAN, 2012).

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1}$$

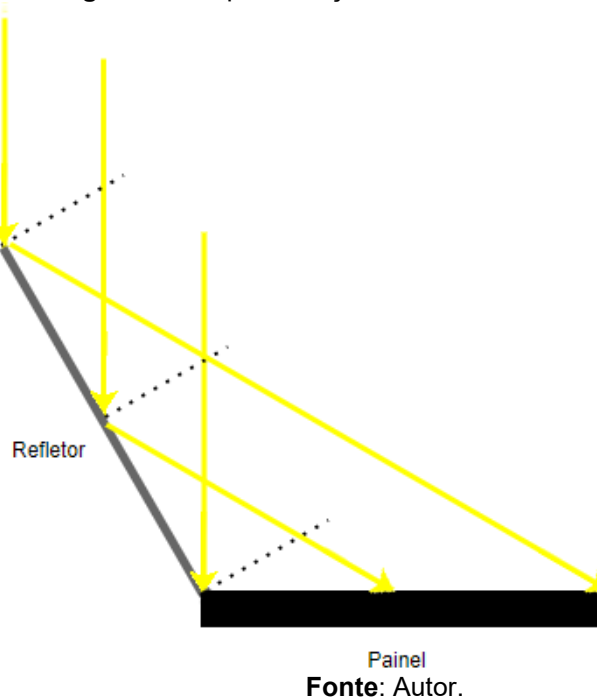
(05)

O índice de refração é uma propriedade de materiais e é definida como a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no determinado meio (YOUNG; FREEDMAN, 2012). Dependendo de seu valor, é possível que toda a luz seja refletida ou que toda seja refractada.

2.2.1 Aplicação de Refletores

A forma como refletores aumentam a geração de módulos fotovoltaicos pode ser entendido por meio de ótica geométrica. O aumento da potência gerada pelo módulo fotovoltaico ocorre por meio do aumento da incidência de luz sobre o módulo devido à lei da reflexão e as relações geométricas entre módulo, refletor e raios de luz, como exemplificado na Figura 02.

Figura 02: Representação do uso de refletores



Partindo deste entendimento inicial do sistema, é possível analisá-lo fisicamente a fim de encontrar a relação entre o ângulo do refletor e quanto de luz é

refletido para o módulo e, com esta, encontrar o ângulo ótimo em que há a maior intensidade de reflexão.

Figura 03: Representação do sistema



Fonte: Autor.

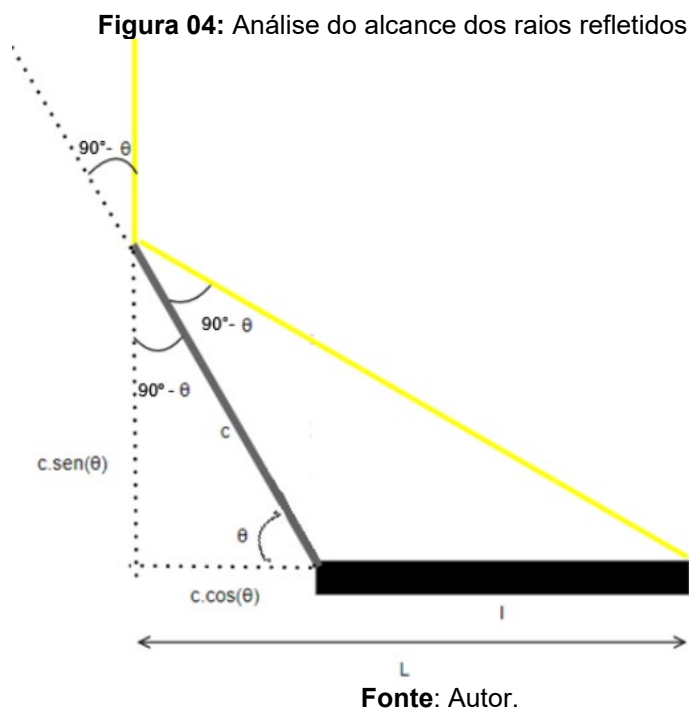
Considerando uma insolação perpendicular ao módulo a fim de simplificar o processo de análise, vê-se que um feixe de raios incide sobre a área da projeção superior do refletor. Considerando o ângulo de inclinação do refletor θ como o ângulo entre o refletor e um eixo perpendicular ao módulo, o comprimento c como o comprimento do refletor e a largura w como a largura de ambos módulo e refletor, então tem-se que tal área é igual à:

$$A_{irr, rft} = w \cdot c \cdot \cos(\theta) \quad (06)$$

Assim, pode-se ver que, o quanto de luz que pode ser refletida depende do cosseno deste ângulo de tal forma que quanto menor o ângulo, menor a área projetada e, portanto, menor a incidência de luz solar sobre o refletor e, assim, menor é o ganho de potência pelo uso do refletor.

Uma vez refletidos, os raios se direcionam para o solo, projetando-se sobre uma área cuja extensão depende do ângulo θ e cujo valor é o produto da largura w e de um comprimento L que é o alcance máximo dos raios refletidos.

Este alcance máximo pode ser calculado analisando a trajetória do raio mais distante a atingir o refletor e assim ser refletido. Este raio, visto na Figura 04, atinge a ponta do refletor que está mais distante do módulo e é redirecionado, atingindo o solo ou o refletor e formando um triângulo cuja base é o comprimento L e cuja altura é a projeção traseira do refletor.



Assim, é possível perceber que em ângulos maiores que o ângulo ótimo, parte dos raios refletidos são perdidos por não acabar incidindo sobre o módulo, chegando a um ponto em que todos os raios refletidos são desperdiçados.

Juntando os dois pontos encontrados, vê-se que o ângulo ótimo é o ponto que minimiza as duas perdas, isto é, o que gera o maior aumento do valor da irradiação sobre o módulo fotovoltaico, de forma que a área projetada superiormente pelo refletor seja a maior possível, sem que existam perdas de raios incidindo fora da área do módulo. Vendo pela Figura 04, este é o ponto em que a Equação 07 é satisfeita.

$$L = l + c \cdot \cos(\theta) \quad (07)$$

Por meio das relações trigonométricas entre o refletor, suas projeções e o raio, encontra-se que o ângulo formado pelo raio refletido e a projeção vertical é igual a 2θ , de onde as relações das equações 08 e 09 são encontradas.

$$L = l + c \cdot \cos(\theta) = c \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(180^\circ - 2\theta) \quad (08)$$

$$\cos(\theta) - \sin(\theta) \cdot \tan(180^\circ - 2\theta) - \frac{l}{c} = 0$$

(09)

Por fim, por meio de identidades trigonométricas, é possível resolver a Equação 09 de forma analítica, encontrando-se que o ângulo ótimo é dado pela fórmula da Equação 10.

$$\theta_{otm} = 90^\circ - \left(-\frac{c}{l} \pm \frac{\sqrt{\left(\frac{c}{l}\right)^2 + 8}}{16} \right)$$

(10)

Ou seja, o ângulo ótimo depende da razão entre o comprimento do módulo e do refletor. Para $l = c$, que foi a relação utilizada no sistema de prova, o valor deste ângulo é 60° .

Por este mesmo raciocínio, pode-se encontrar a fórmula do ângulo ótimo para qualquer que seja o ângulo dos raios que incidem sobre o sistema, bastando encontrar o ângulo θ que satisfaça as condições do ponto ideal.

Analisando o mesmo sistema da Figura 02, mas considerando que o ângulo dos raios solares não seja necessariamente 90° e que tenha um valor α medindo-se em sentido horário e que o ângulo formado entre o refletor e o raio refletido tenha um valor β , também em sentido horário, vê-se a relação entre os ângulos é dada por:

$$\theta + \beta - \alpha = 0^\circ$$

(11)

Repetindo os passos da análise realizada para $\alpha = 90^\circ$, mas considerando que agora β não é necessariamente igual a $90^\circ - \theta$, verifica-se que os ângulos e lados do triângulo retângulo formado pelas projeções do refletor, o comprimento do módulo e o raio refletido se relacionam pela equação:

$$\frac{l + c \cdot \cos(\theta)}{c \cdot \sin(\theta)} = \tan(90^\circ - \theta + \beta)$$

(12)

Inserindo a Equação 11 na Equação 12 de modo a substituir β , tem-se que:

$$\frac{l + c \cdot \cos(\theta)}{c \cdot \sin(\theta)} = \tan(90^\circ - \theta + \alpha - \theta) \quad (13)$$

Por fim, rearranjando os termos, tem-se a equação que nos dá o ângulo ótimo θ_{otm} para um determinado valor de α :

$$\sin(\theta_{otm}) \tan(90^\circ + \alpha - 2\theta_{otm}) - \cos(\theta_{otm}) - \frac{l}{c} = 0 \quad (14)$$

2.3 Geração Fotovoltaica

É a forma de geração de energia elétrica que utiliza como fonte a luz solar e como gerador células de material semicondutor denominadas de células fotovoltaicas (BHATIA; GUPTA, 2018). É uma forma de geração versátil, sendo utilizada em aplicações tais como pequenas cargas e equipamentos portáteis como calculadoras, alimentação de residências e comércios, em regiões rurais ou isoladas em que o acesso à rede elétrica é impossível ou difícil e usinas que abastecem cidades ou regiões (BHATIA; GUPTA, 2018).

2.3.1 Princípio de Funcionamento

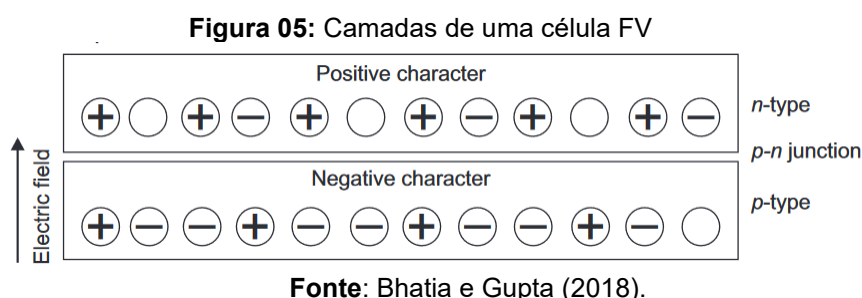
Esta forma de geração se baseia no efeito fotoelétrico, um fenômeno físico em que certos materiais, em especial os semicondutores, liberam elétrons quando luz incide sobre eles (BHATIA; GUPTA, 2018). Essa liberação de elétrons é proporcional à intensidade da luz e é mais intensa quando os raios de luz incidentes são perpendiculares à superfície do material (BHATIA; GUPTA, 2018).

Quando luz incide sobre um módulo fotovoltaico, parte dos fótons são refletidos e parte é absorvida. O efeito fotoelétrico ocorre na colisão de parte destes fótons com

elétrons presentes nas moléculas do material semiconductor, quando ocorre uma transferência de energia para estes elétrons que passam a poder sair de suas posições e poder se mover (BHATIA; GUPTA, 2018).

Caso o módulo esteja ligada a um circuito elétrico, estes elétrons saíram de suas posições e deixando um espaço vago que atrai os elétrons vizinhos que saem de suas posições também deixando um espaço vago no lugar (BHATIA; GUPTA, 2018). Isso provoca uma reação em cadeia que gera uma corrente elétrica pelo tempo que o circuito se mantiver fechado ou que luz incidir sobre o módulo (BHATIA; GUPTA, 2018).

Células fotovoltaicas são construídas de forma a tomar o máximo de proveito deste efeito. Elas são compostas de três camadas justapostas de um material semiconductor, uma camada de material tipo p ou n, uma junção p-n e outra camada com tipo oposto à primeira camada, como ilustrado na Figura 05 (BHATIA; GUPTA, 2018).

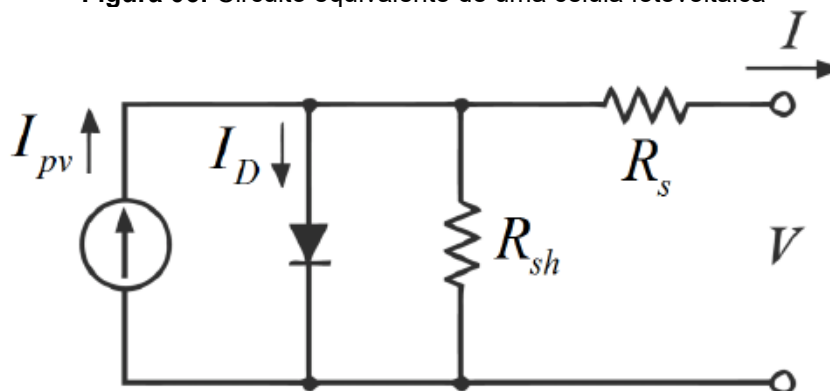


A junção p-n visa formar um diodo, que permitirá a passagem de corrente no sentido pretendido para a saída do módulo, mas não no sentido contrário (BHATIA; GUPTA, 2018). Assim, as camadas exteriores passam a formar um campo elétrico em decorrência da diferença de carga entre elas, que será responsável por provocar o movimento ordenado dos elétrons quando houver incidência de luz sobre a célula e ela estiver conectada a uma carga (BHATIA; GUPTA, 2018).

2.3.2 Características e Parâmetros Elétricos

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica é uma fonte de corrente em paralelo com um diodo e com duas resistências que modelam as perdas, uma em paralelo com a fonte e outra em série (MCEVOY; MARKVART; CASTAÑER, 2012).

Figura 06: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: Pindado e Cubas (2014).

A relação entre a corrente de saída I e a tensão V nos terminais da célula é dada pela equação de Shockley (MCEVOY; MARKVART; CASTAÑER, 2012):

$$I = I_{cc} - I_D \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (15)$$

E a tensão de circuito aberto V_{ca} é dada pela equação:

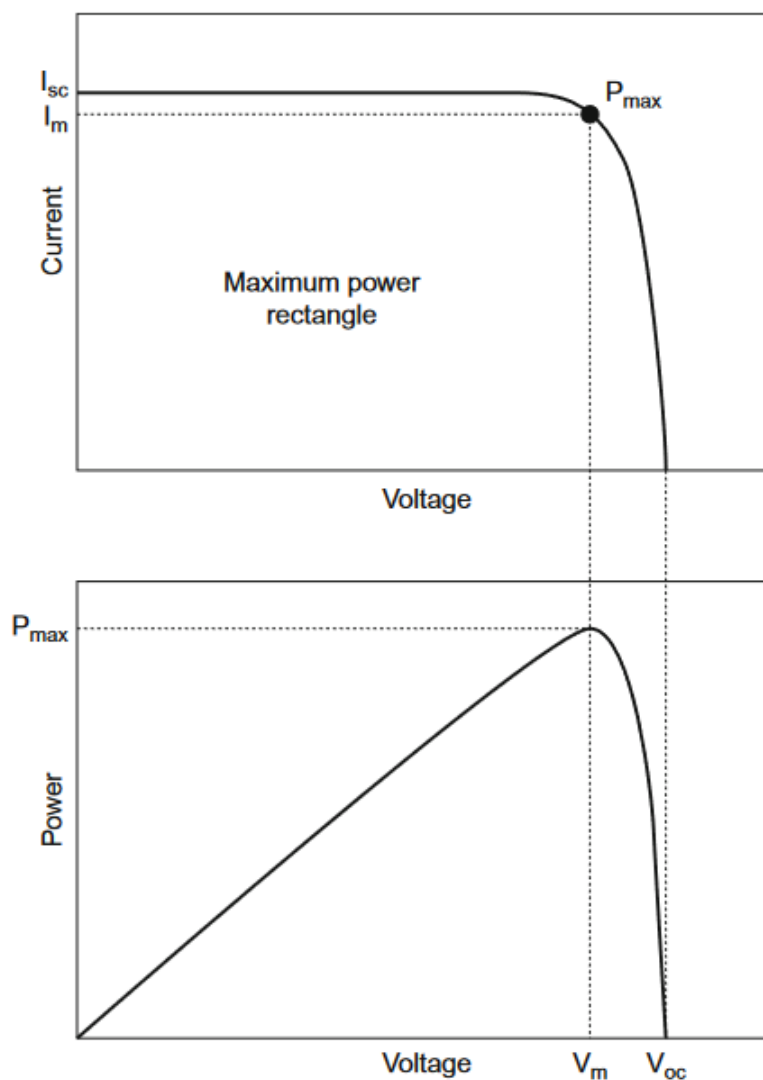
$$V_{ca} = \frac{K_B T}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{cc}}{I_o} \right) \quad (16)$$

Em que I_{cc} é a corrente de curto-circuito da célula, I_D é a corrente consumida pelo diodo em paralelo, k_B constante de Boltzmann, T é a temperatura da célula em Kelvin e q é a carga do dipolo formado entre as camadas de semicondutor p e n (MCEVOY; MARKVART; CASTAÑER, 2012).

Esta relação entre tensão e corrente produz as curvas vistas na Figura 07, respectivamente, a curva de corrente por tensão e a curva de potência por tensão.

Estas são curvas características que são utilizadas para a análise do desempenho e da eficiência de módulos fotovoltaicos.

Figura 07: Curvas características de células fotovoltaicas



Fonte: McEvoy, Markvart e Castañer (2012).

O primeiro dado que pode ser obtido destas curvas é a máxima potência que pode ser alcançada pela célula ou pelo módulo e que ocorre no ponto conhecido como o “joelho” da curva $I \times V$. Outro parâmetro importante é o fator de preenchimento, que é a razão entre esta potência e o produto de V_{ca} e I_{cc} e que é uma medida de quanta energia é desperdiçada nas perdas elétricas da geração, assim servindo como uma medida indireta da eficiência (MCEVOY; MARKVART; CASTAÑER, 2012).

Por fim, a eficiência da geração é dada pela razão entre a potência elétrica gerada na saída e a potência luminosa que incide sobre o módulo, ou seja, quanto

dessa energia é aproveitada descartando-se as perdas por reflexão, por fótons que perpassam o material sem colidir com algum elétron e as perdas por aquecimento devido a resistência das camadas (BHATIA; GUPTA, 2018).

Na prática, a definição de eficiência utilizada por fabricantes de módulos fotovoltaicos é a razão entre o máximo de potência que pode ser extraído da célula sobre a potência luminosa incidente nas condições normais de temperatura e pressão e para uma irradiância de 1000 W/m² (BHATIA; GUPTA, 2018).

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \cdot A_C} = \frac{P_{max}}{1000 \cdot A_C} \quad (17)$$

Para a confecção de módulos fotovoltaicos, as células são juntas em uma superfície plana e ligadas em série e paralelo de forma a conferir ao todo as características elétricas desejadas (BHATIA; GUPTA, 2018).

A irradiância sobre a célula fotovoltaica afeta sua saída de tal forma que seu aumento provoca um aumento na corrente de saída da célula, ao passo que a tensão se mantém praticamente constante, assim provocando um aumento da potência de saída da célula (KASIM; ATWAN; ELIEWI, 2018).

A temperatura é um dos fatores que afetam a eficiência da célula fotovoltaica. O aumento de temperatura gera uma redução da tensão de saída das células, enquanto a corrente de saída tem uma variação desprezível, de tal forma que há uma diminuição da eficiência (KASIM; ATWAN; ELIEWI, 2018).

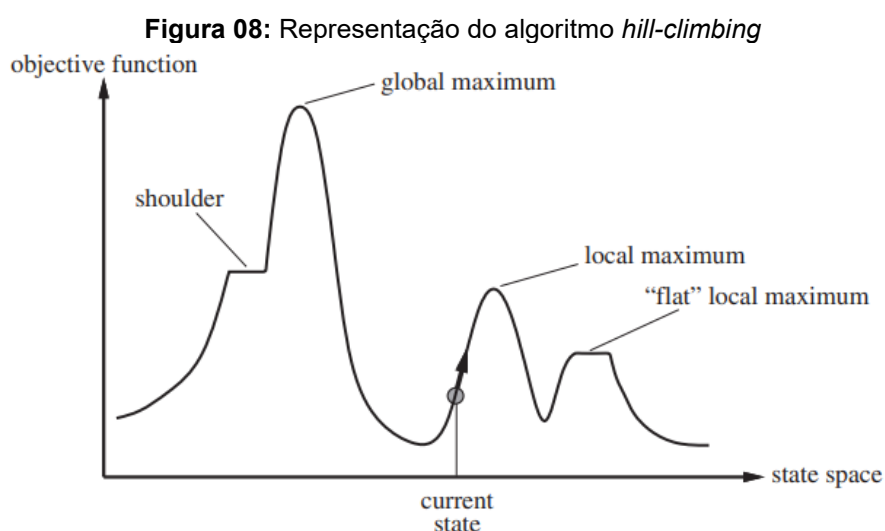
2.4 Algoritmo *hill-climbing*

O algoritmo *hill-climbing* (em tradução, algoritmo de subida de encosta ou subida de morro), também chamado de algoritmo de busca local gananciosa, é um algoritmo de busca e otimização local. Seu funcionamento consiste em realizar pequenas variações nas grandezas de entrada da função a ser otimizada e, então observar sua saída (RUSSELL; NORVIG, 2016).

Caso a saída atual seja maior que a anterior, o próximo passo é dado na mesma direção e no mesmo sentido que o passo anterior, caso contrário, reverte-se ambos e

o algoritmo reinicia-se para o lado contrário. O algoritmo se encerra quando encontra um ponto de máximo local, em que incrementar ou decrementar as entradas causará uma redução no valor de saída de forma inexorável (RUSSELL; NORVIG, 2016).

A função a ser otimizada pelo encontro de um ponto de máximo pode ser diretamente a sua saída ou uma função de avaliação que classifica a saída conforme uma série de critérios (RUSSELL; NORVIG, 2016). Neste último caso, o ponto de máximo significa um ponto dentro da região em que o algoritmo realizou sua busca que melhor atende aos requerimentos desejados para solução de um problema.



Fonte: Russel e Norvig, (2016)

A principal vantagem deste algoritmo é sua simplicidade, tanto em sua implementação quanto seu funcionamento. Este algoritmo não depende do uso de memória ou de árvores de busca para armazenar todos os passos anteriores, bastando, no pior caso, armazenar os valores de estado e de valor das entradas e da saída atuais e do passo anterior (RUSSELL; NORVIG, 2016). Além disso, não há qualquer tentativa de prever ou de analisar os próximos passos, bastando analisar os vizinhos imediatos do ponto em que o algoritmo se encontra na função de saída durante a busca pelo ponto máximo (RUSSELL; NORVIG, 2016).

A principal desvantagem deste algoritmo é a incapacidade de diferenciar entre um ponto de máximo local, um ponto de máximo global e um ponto de platô (vide a Figura 08). Assim, a busca terminará no ponto de derivada nula que não seja um vale mais próximo, podendo este ser um ponto de máximo local abaixo do melhor ponto possível ou mesmo numa região em que a função é plana e que não corresponde a nenhuma otimização da função (RUSSELL; NORVIG, 2016).

Há também variações deste algoritmo que buscam solucionar o problema supracitado, adicionando elementos aleatórios ao funcionamento do algoritmo de forma a forçá-lo a buscar novas soluções além da primeira encontrada (RUSSELL; NORVIG, 2016). Por exemplo, a técnica de reinício aleatório recomeça a busca periodicamente a partir de um ponto aleatório dentro do domínio das entradas, retendo sempre a melhor solução encontrada dentre todas (RUSSELL; NORVIG, 2016).

2.5 Revisão de Literatura

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos em que o uso de refletores na geração de energia solar fotovoltaica é estudado e em que seu desempenho e efeitos são investigados.

O artigo de Rizk e Nagrial (2008) explora os efeitos dos refletores no desempenho de sistemas fotovoltaicos. Ele estuda a influência do número e material dos refletores a fim de descobrir a melhor combinação desses fatores. Os pesquisadores compararam o uso de dois e de quatro refletores e os materiais cromo, alumínio e aço inoxidável, obtendo como resultado que o uso de quatro refletores não compensa o custo adicional e que o material de melhor desempenho é o cromo. Então, buscou-se o ângulo ótimo para estas condições, encontrando-se o valor de $22,5^\circ$. Então a estrutura montada com o módulo e os refletores neste ângulo foi submetido a um ensaio em que foi exposto à luz solar ao ar livre ao longo do dia, com a potência de saída sendo mensurada. Então este ensaio foi repetido para o módulo sem refletores estático e com rastreamento solar para fins de comparação. O estudo concluiu que houve um ganho médio de 40% pelo uso dos dois refletores em relação ao módulo sozinho, com maior aumento em torno do meio-dia quando o ângulo de incidência da luz solar é próximo de 90° e a irradiação é máxima.

ANAND *et al* (2014) se utiliza de um módulo de proporções pequenas e um simulador de luz solar para testar diferentes combinações de materiais e ângulos para encontrar a combinação ideal e comparar o ângulo ótimo obtido empiricamente com o calculado por modelos matemáticos nas simulações. Eles utilizaram dois refletores em todos os casos. Com os experimentos, verificou-se que o ângulo ótimo encontrado atende ao esperado pelos cálculos, o que corresponde a aproximadamente 13° para o sistema teste do trabalho. Também se verificou que o vidro, como material do

refletor, teve o melhor desempenho dentre os materiais testados. Com a combinação de melhores material e ângulo, a potência gerada foi próxima ao dobro do valor com apenas o módulo, sem refletores.

Elmeadawy *et al* (2019) fizeram um estudo comparativo em que mediram a irradiância e a temperatura sobre a superfície de um módulo fotovoltaico de 0,66 m por 1,47 m sem o uso refletores e com o uso de dois refletores de três materiais, níquel-crômio, alumínio folhado e vidro, também testando cada material em diferentes ângulos. O experimento de teste consistiu em colocar os sistemas ao ar livre ao longo do dia, das 08:00 até as 17:30, medindo a irradiação e temperatura na superfície do módulo a cada 30 minutos. Eles encontram ganhos próximos para os três materiais, porém o crômio tendo o melhor desempenho dentre todos. Também verificaram o aumento de temperatura do módulo em virtude do uso dos refletores, sendo que no pior caso, em torno de 12:30, houve um aumento de 15 °C na temperatura do módulo.

Kasim, Atwan e Eliewi (2018) fizeram um estudo simples, comparando potência e temperatura de um módulo fotovoltaico com e sem o uso de um par de refletores. Eles encontraram que o aumento de irradiância causado pelos refletores aumenta a corrente de curto-circuito gerada pelo módulo, mas o aumento de temperatura diminui a tensão de circuito aberto. O ganho de potência obtido com os refletores decorre do fato de que a perda de tensão é menor que o ganho de corrente, de tal forma que a potência resultante continua maior que um módulo sem o uso de refletores.

Dutra, Rodrigues e Sedor (2019) estudaram o uso de refletores aliados a um sistema de rastreamento solar como forma de compensação em momentos de menor insolação, em especial, por culpa da passagem de nuvens que bloqueiam a luz solar. No sistema montado por eles, foi usado um rastreamento solar de eixo único com um sensor de intensidade luminosa feito com LDRs, de forma a buscar a direção de melhor irradiância e foram usados um par de refletores de mesmas dimensões do módulo em um ângulo ótimo de 120° em relação ao módulo que foi calculado. Eles obtiveram bons resultados, com uma melhora significativa da eficiência na geração, com um ganho que chegou a 127,84 % em relação a um módulo só nos momentos de céu encoberto.

Kim *et al* (2022) fizeram a avaliação de uma proposta de uso de refletores para o aumento da geração de energia em módulos fotovoltaicos colocados em telhados de residências. O estudo foi realizado utilizando uma análise computacional com modelos matemáticos da irradiação e distribuição da luz solar no sistema e utilizando

dados meteorológicos para cidade de *Calgary*, no Canadá, onde o estudo foi realizado, e para diferentes ângulos de inclinação de telhado e para um refletor fixo e cuja angulação foi modificada mensalmente de acordo com a mudança da posição solar. Os resultados da análise mostraram um aumento da geração de energia, cujo valor dependeu da combinação de ângulo de incidência da luz solar, ângulo do módulo, que foi posicionado em paralelo ao telhado em todas as análises, e ângulo do refletor, com valores que chegaram até 21,1 % para o ângulo do refletor fixo e 26,5% para o ângulo do refletor ajustado conforme a variação sazonal da inclinação da luz solar.

O artigo de Bhuvanendran *et al* (2018) apresenta um sistema de módulo fotovoltaico com uso de um refletor com um sistema de atuação em seu ângulo para busca do melhor valor ao longo do dia para aumento de sua eficácia, de forma similar à proposta que será avaliada neste trabalho. No sistema desenvolvido por Bhuvanendran *et al* (2018), o atuador move o refletor ao longo do dia, mudando seu ângulo para o valor ótimo, isto é, o valor em que há maior ganho do refletor, conforme cada hora do dia. Os valores de ângulo ótimo para cada horário são predeterminados no código e foram mensurados previamente pelos autores antes da implementação. Eles obtiveram um ganho de geração no ponto de máxima potência entre 11,14 % e 18,62% em relação ao módulo sem o refletor, a depender da hora do dia.

Rawat e Chandel (2013) testam e analisam variações do algoritmo *hill climbing* aplicado à problemas de rastreamento de máxima potência, usando uma revisão de literatura para encontrar qual variação proporciona o maior aumento de eficiência à sistemas fotovoltaicos. Ao final do estudo, concluem que a técnica mais robusta e com melhores resultados é o algoritmo *hill climbing* com uso da técnica de condutância incremental, em que o valor da derivada da corrente de saída em função da variação do módulo é usada de referência para calcular os passos de incremento na saída do sistema para encontrar o ponto de pico de forma mais rápida, buscando-se zerar valor o valor desta derivada, porém com a desvantagem de ter maior complexidade e custos de implementação maiores.

Nejila e Selvakumar (2013) descrevem em seu artigo o desenvolvimento de um sistema de rastreamento de máxima potência em que utilizam lógica *fuzzy* em um algoritmo de *hill climbing* clássico, analisando os resultados e as possíveis melhorias obtidas. O objetivo principal dos pesquisadores era mitigar um problema de instabilidade encontrado na aplicação de algoritmos *hill climbing* em problemas deste

tipo. Utilizando a lógica nebulosa permite-se que o algoritmo reaja de forma diferente conforme as medições de entrada e saída, calculando o tamanho dos passos de incrementos ou decrementos aplicados à saída de acordo com a quão próxima a saída está de seu ponto de pico.

Em seu trabalho, Bouakkaz, Boukadoum e Boudebbouz (2020) também desenvolveram um sistema de rastreamento de máxima potência implementando um algoritmo de *hill climbing* em conjunto com uso de lógica *fuzzy*, com objetivo de melhorar o tempo de convergência sem provocar instabilidade no sistema. De forma semelhante, o algoritmo tem o objetivo de tornar o passo da perturbação na saída do sistema adaptável, isto é, que seja maior quando a derivada da saída tenha uma magnitude maior, e menor quando próximo ao ponto de pico, em que a derivada tem magnitude menor. O estudo teve resultados positivos, em especial quando os pesquisadores provocavam mudanças bruscas de temperatura e de irradiância, de forma a simular condições ambientais reais, convergindo ao novo ponto de pico em um intervalo menor que 50 ms.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir estão os materiais utilizados com suas características técnicas e a metodologia utilizada no desenvolvimento do projeto.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para a realização deste projeto podem ser divididos nas módulos fotovoltaicos, no refletor, na estrutura que foi montada para suporte dos módulos e do refletor, nos componentes eletrônicos e circuitos utilizados para medições de grandezas relativas ao funcionamento do sistema, no sistema mecânico que move o refletor e na luminária que foi utilizada para simulação da luz solar.

Abaixo estão todos os materiais com as suas respectivas características.

3.1.1 Módulos fotovoltaicos KM (P) 10

É um módulo fotovoltaico fabricado pela empresa chinesa Komaes, com potência nominal de 10 W. Foi utilizado por estar disponível no campus.

O módulo é composto de 36 células fotovoltaicas de silício policristalino e dimensões de 52 mm por 33 mm. No todo, as dimensões do módulo são 370 mm de comprimento, 250 mm de largura e 18 mm de altura (KOMAES, 2009).

Figura 09: Módulo fotovoltaico KM (P) 10



Fonte: Solar Brasil (2022).

Sua tensão e sua corrente quando em carga máxima são, respectivamente, 17,56 V e 0,6 A. Sua tensão de circuito aberto é 21,52 V e sua corrente de curto-circuito é 0,66 A (KOMAES, 2009).

A eficiência individual de cada célula é de 13,7 % e a eficiência efetiva do módulo é 9,07 %, com um coeficiente de temperatura de potência de -0,5 %/°C. A temperatura nominal de operação das células é de aproximadamente 47 °C e as temperaturas de operação vão de -40 até 85 °C (KOMAES, 2009).

Foram utilizados dois módulos ligados em série, formando um arranjo fotovoltaico. Os módulos fotovoltaicos foram dispostos lado a lado na estrutura.

3.1.2 Refletor

Foi usado um refletor de vidro de 6 mm de espessura com dimensões de 595 mm de comprimento por 400 mm de largura. Ele foi montado colando-se a chapa de vidro espelhado em uma chapa de madeira de 20 mm espessura, 595 mm por 440 mm, em que os 40 mm excedentes servem de espaço para colocação das dobradiças que ligam o refletor à estrutura de suporte. O refletor pode ser visualizado na Figura 09.

3.1.3 Estrutura de Suporte

A estrutura de suporte para o arranjo, o refletor e o sistema mecânico foi construída com tábuas de madeira que foram juntas para formar uma estrutura semelhante a uma pequena mesa. Ela tem 150 mm de altura, 700 mm de comprimento e 450 mm de largura.

Figura 10: Estrutura com o refletor e os módulos



Fonte: Foto de autoria própria.

O refletor foi fixado com dobradiças para permitir o movimento de giro e os módulos foram colocados na parte superior da estrutura, sem serem presas de alguma

forma e a estrutura foi posta e utilizada sobre uma mesa. O sistema mecânico foi fixado na parte traseira da estrutura por meio de uma tábua e uma mão francesa.

3.1.4 Carga XL20DE04.14

É uma carga resistiva fabricada pela empresa Labtrix e cujo valor é configurável por meio de quatro chaves liga-desliga. O valor da resistência nos terminais pode ser configurado para um curto-circuito, um circuito aberto ou um valor entre 50 e 750 Ω , em passos de 50 Ω .

Figura 11: Carga configurável



Fonte: Foto de autoria própria.

3.1.5 Arduino UNO

É uma placa de desenvolvimento *open-source* projetado por uma empresa italiana de mesmo nome. Foi utilizada a versão Arduino UNO R3, que conta com um microcontrolador Atmega328P na versão SMD, 13 pinos de entrada e saída digitais, sendo que 6 destes suportam saída PWM, e 6 entradas analógicas que permitem a leitura de tensões entre 0 e 5 V. Também tem portas com tensões de 5 V e 3,3 V para alimentação de outros circuitos (ARDUINO, 2022).

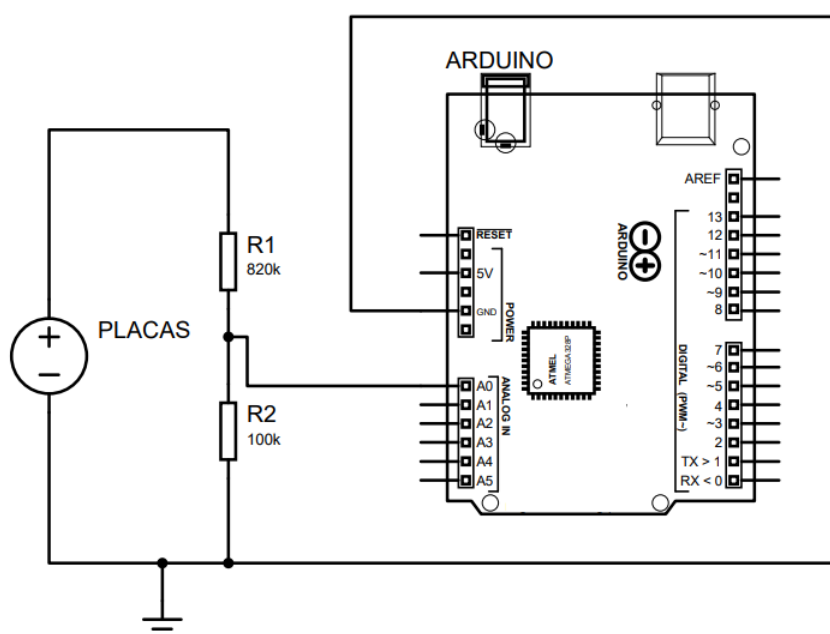
Suporta comunicação USB para conexão com um computador e que serve tanto para comunicação de dados e comandos quanto para a programação do microcontrolador. Sua frequência de *clock* é de 16 MHz (ARDUINO, 2022).

Sua tensão de alimentação deve ser entre 7 e 12 V, a corrente máxima por pino é de 40 mA, mas a corrente máxima total que o Arduino suporta é de 200 mA (ARDUINO, 2022).

3.1.6 Circuito de Medição de Tensão

O circuito de medição da tensão de saída do arranjo consiste num divisor de tensão simples ligado em paralelo ao arranjo e composto de um resistor de 820 k Ω e outro de 100 k Ω . Os valores foram escolhidos dentre os resistores disponíveis no laboratório do campus de forma que a tensão sobre o segundo resistor não superasse 5 V para o intervalo de medição, que é de 0 a 45 V.

Figura 12: Ligação do circuito de medição de tensão



Fonte: Esquemático de autoria própria.

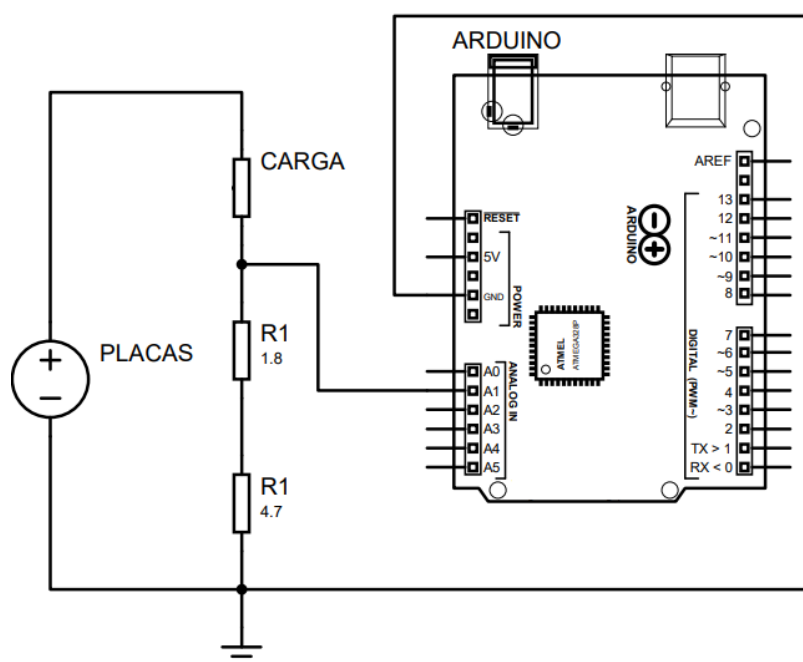
3.1.7 Circuito de Medição de Corrente

A medição da corrente do arranjo foi feita com dois resistores *shunt* colocados em série, um de 1,8 Ω e outro de 4,7 Ω , totalizando 6,5 Ω . O par de resistores foi ligado

entre a saída da carga e o GND, onde também foi conectado o terminal negativo do arranjo.

Os valores das resistências foram escolhidos dentre os disponíveis no laboratório do campus e de forma que o valor total do par em série tivesse um valor alto suficiente para que uma porta analógica do Arduino pudesse ser utilizada para realizar a medição, mas não tão alto a ponto de interferir demasiadamente no objeto de medição.

Figura 13: Ligação do circuito de medição de corrente

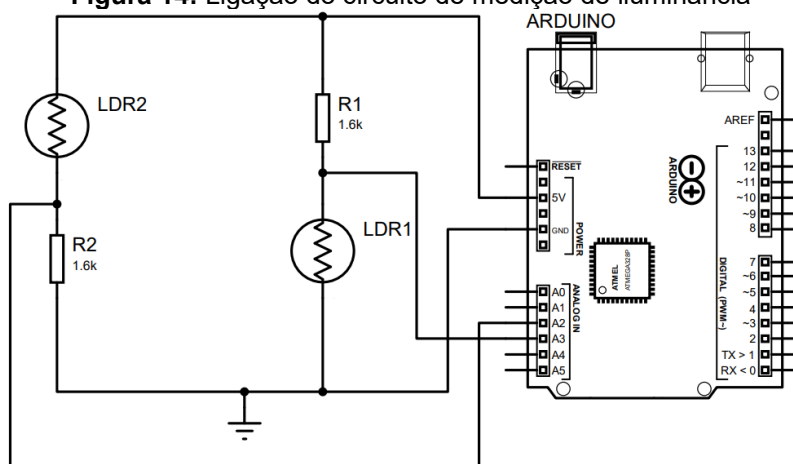


Fonte: Esquemático de autoria própria.

3.1.8 Circuito de Medição de Iluminância

É uma ponte de Wheatstone composta de um par de resistências de 1,6 kΩ e um par de *light-dependent resistors* (LDR). Esta ligação, feita conforme a Figura 14, foi escolhida de forma a melhorar a sensibilidade da medição com os LDRs.

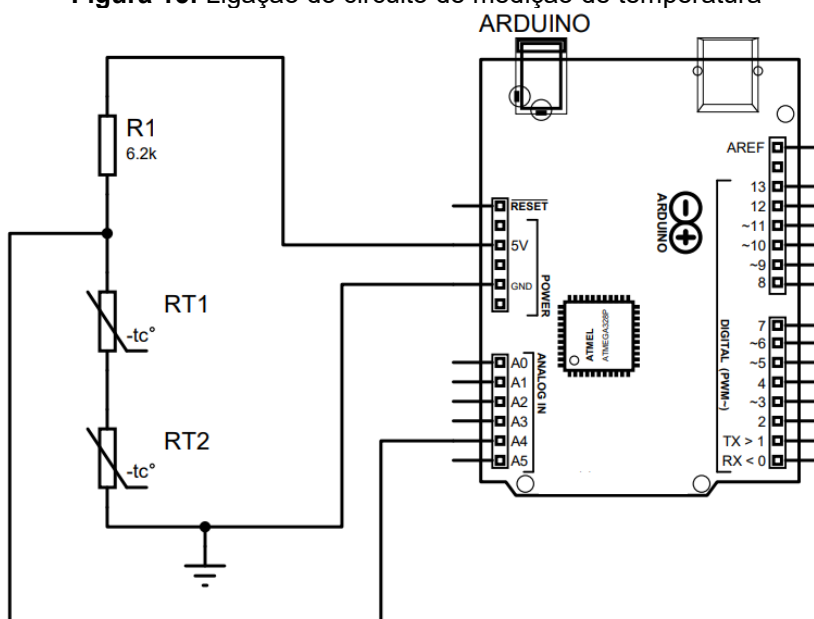
Os LDRs utilizados são do modelo GL5528 da fabricante CdS (CDS, 2022). Sua resistência sob uma iluminância de 10 lux varia entre 8 e 20 kΩ e seu valor mínimo para uma iluminância de 0 lux é de 1 MΩ (CDS, 2022). Sua potência máxima é de 150 mW, sua tensão máxima é de 150 V e sua temperatura de operação é entre -30 e 70 °C (CDS, 2022).

Figura 14: Ligação do circuito de medição de iluminância

Fonte: Esquemático de autoria própria.

3.1.9 Circuito de Medição de Temperatura

Consiste num divisor de tensão entre uma resistência de 6,2k Ω e dois sensores de temperatura resistivos NTC iguais. Usou-se o sensor NTC SB-41 da fabricante Full Gauge Controls. O sensor é isolado e revestido por poliéster termoplástico, sua resistência de referência a 25 °C é 10 k Ω , sua precisão é de 1 % do fundo de escala e ele mede temperaturas entre -50 e 105 °C (FULL GAUGE CONTROLS, 2022).

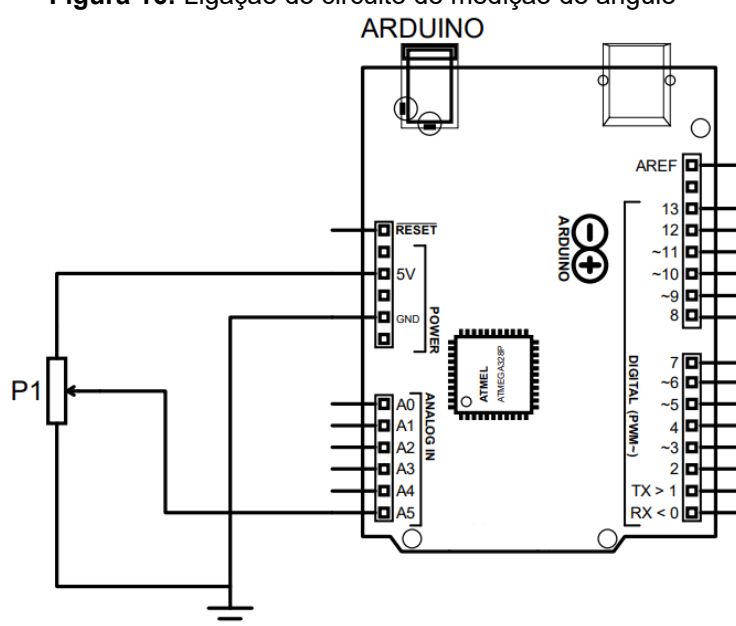
Figura 15: Ligação do circuito de medição de temperatura

Fonte: Esquemático de autoria própria.

3.1.10 Circuito de Medição de Ângulo

A medição do ângulo do refletor foi feita com um único potenciômetro linear de 10k Ω que foi fixado no eixo de rotação do refletor. O potenciômetro foi fabricado pela empresa Alps Alpine e seu modelo é RK097N e ele tem 3 pinos (ALPS ALPINE, 2022). Ele tem uma tolerância de 20 %, ângulo total de rotação de 300°, tensão máxima de 50 V para corrente alternada e 10 V para corrente contínua e temperatura de operação de -20 a 70 °C (ALPS ALPINE, 2022).

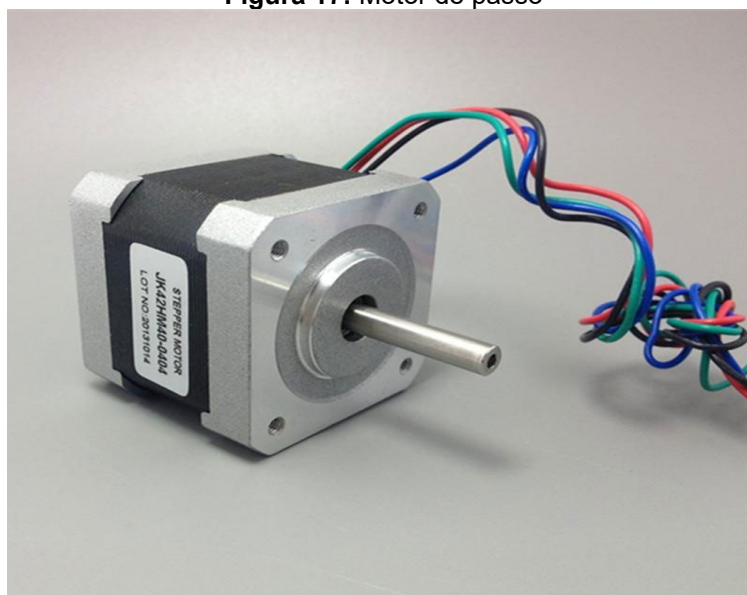
Figura 16: Ligação do circuito de medição de ângulo



Fonte: Esquemático de autoria própria.

3.1.11 Motor de Passo JK42HS40-1004AC

Motor de passo da fabricante chinesa JKongMotor. Seu torque nominal é de 4 kg.cm, sua tensão nominal é de 3,9 V e sua corrente nominal é de 1 A (ECKSTEINIMG, 2022).

Figura 17: Motor de passo

Fonte: Alibaba (2022).

O motor faz 1,8° por passo, com precisão de 5 %, sua força máxima radial é de 28 N e sua força máxima axial é de 10 N. Sua temperatura de operação ambiente é de -20 a 50 °C e a temperatura máxima que ele pode aquecer é 80 °C (ECKSTEINIMG, 2022).

3.1.12 Sistema Mecânico

O sistema mecânico responsável por mover o refletor é composto de uma rosca de 6mm de diâmetro que é presa ao eixo do motor de passo por meio de um acoplador, dois trilhos, um no refletor e outro na estrutura de sustentação do sistema mecânico e de uma peça composta de uma porta soldada em uma haste faz contato com o refletor por meio do trilho e ligada a uma peça em “L” que dá sustento e a mantém presa no trilho inferior.

Figura 18: Sistema mecânico

Fonte: Foto de autoria própria.

3.1.13 Luminárias e Lâmpadas

Foram montadas e utilizadas duas luminárias durante o desenvolvimento do projeto. A primeira luminária foi pensada e utilizada no estudo de viabilidade do controle indireto da temperatura, enquanto a segunda luminária foi projetada para os estudos do rastreador.

A primeira luminária é composta de uma superfície forrada com papel laminado e com 13 bocais de lâmpadas presos a ela. A superfície é mantida sobre os módulos e o refletor por duas hastes horizontais de madeira que são ligadas a duas outras hastes verticais, uma de metal, que é uma haste de suporte de manequins que foi reaproveitada e uma outra de madeira que é auxiliar. A luminária foi feita com base em tentativa e erro com alguns experimentos.

Figura 19: Primeira luminária

Fonte: Foto de autoria própria.

Foram usadas 4 lâmpadas incandescentes de 250 W, 4 lâmpadas incandescentes de 60 W e 5 lâmpadas LED de 20 W. As lâmpadas foram organizadas na luminária conforme a Figura 19.

A segunda luminária é composta de um arco de alumínio fixado na mesma haste de metal utilizada na primeira luminária, servindo para sua sustentação e de um pequeno cano de PVC onde foram colados um bocal de lâmpada em seu exterior e uma porca em seu interior, no lado oposto ao do bocal e onde um pequeno orifício foi feito. Desta forma, o bocal pode ser deslizado pelo arco de alumínio e fixado numa determinada posição por um parafuso que foi enroscado na porca pelo orifício. Foi utilizada uma única lâmpada de 250 W nesta luminária.

Figura 20: Segunda luminária

Fonte: Foto de autoria própria.

3.2 Métodos

A seguir estão as descrições das metodologias utilizadas para o desenvolvimento de cada etapa deste trabalho.

3.2.1 Testes Iniciais e Levantamento de Dados do Arranjo

Os equipamentos foram colocados e utilizados no laboratório de sistemas de potência do campus Itajaí do IFSC, que serviu de ambiente para a maior parte dos experimentos. Tal ambiente pode ser visto na Figura 21, sendo uma sala com paredes brancas e uma parede com janelas por toda a sua extensão voltadas para, aproximadamente, sudoeste e sem cortinas ou persianas.

Figura 21: Laboratório de sistemas de potência

Fonte: Foto de autoria própria.

Os experimentos foram realizados entre 13:30 e 16:00, de forma a manter um certo padrão de interferência da luz solar externa pelos resultados e as luzes da sala foram desligadas antes dos experimentos, a fim de não causar interferência sobre as medições. As janelas estiveram fechadas após ter sido verificado, durante o desenvolvimento do trabalho, que a ventilação vinda do ambiente externo interferia com as leituras de temperatura, porém a porta foi mantida aberta para que a sala não fosse fechada por completo e alguma ventilação fosse mantida.

Foram realizados testes iniciais com o arranjo e com os circuitos e sensores de medição utilizando a primeira luminária, a fim de verificar o funcionamento adequado de todas as partes e realizar os ajustes necessários aos circuitos de medição e à programação do Arduino. Além disso, o ponto ótimo do refletor foi encontrado de forma manual, buscando o ângulo em que a corrente de curto-circuito fosse máxima, para que este pudesse ser utilizado nos experimentos posteriores.

Os ajustes realizados na medição foram feitos comparando o resultado obtido pelo Arduino ao de um instrumento de medição apropriado para cada grandeza e, então, modificando o circuito ou a programação para adequar os resultados.

Antes do início da primeira etapa do estudo, foi realizado um experimento para a obtenção da curva de potência por tensão do arranjo utilizadas para se ter uma visão acerca de seu funcionamento e de referência para a análise dos dados dos experimentos futuros.

Este experimento foi realizado variando o valor da carga dentre os valores disponíveis do menor, um curto-circuito, até o maior, um circuito aberto e, em cada valor, foram feitas dez medições de cada grandeza e então a média destes valores foi calculada e enviada a um *software* de tratamento de dados. Este procedimento foi realizado duas vezes, uma com o refletor coberto com um pano preto e colocado próximo de 0° e outra com o refletor descoberto e colocado no seu ângulo ótimo.

Decidiu-se utilizar a variável de potência elétrica de saída do arranjo fotovoltaico para a análise das propostas devido a esta ser diretamente ligada com a eficiência de saída do sistema.

3.2.2 Investigação do Aumento de Eficiência por Controle Indireto da Temperatura

O procedimento adotado para averiguar a viabilidade do controle indireto de temperatura para ganho de eficácia do refletor foi de comparar a relação entre perdas de geração pelo aumento de temperatura e a relação entre o ganho causado pelo refletor e seu ângulo de inclinação, a fim de se descobrir se a diminuição de temperatura causada por uma variação no ângulo de inclinação aumentaria a eficiência do sistema de tal modo que isto superasse a perda causada por essa variação no ângulo, assim aumentando o rendimento final do sistema de geração.

Primeiro, buscou-se entender a relação entre potência e temperatura para o arranjo e, assim, poder estimar a perda por temperatura. Esta relação foi estudada com um experimento em que a luminária foi ligada e as grandezas de tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, temperatura e iluminância foram mensuradas a cada meio minuto. As janelas da sala foram fechadas para evitar o ruído térmico causado por correntes de ar, mantendo-se a porta aberta para evitar fechar a sala por completo.

O procedimento para realização das medições consistiu em duas etapas realizadas em sequência. Na primeira etapa, a carga era configurada para um circuito aberto e então media-se a tensão de saída dos módulos, então a carga era reconfigurada para um curto-circuito e a corrente, a iluminância, a temperatura da superfície dos módulos e o ângulo de inclinação do refletor eram mensurados. Por fim, a carga era reconfigurada para um circuito aberto para a próxima medição. Este procedimento foi repetido sem o refletor e com ele fixado no ângulo ótimo.

Optou-se pela medição da tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito e não pela aplicação de uma carga constante porque assim é possível entender o comportamento da saída do arranjo pela temperatura e, posteriormente, pelo ângulo de inclinação do refletor sem se preocupar com problemas quanto ao valor da carga que seria aplicada e o ponto no qual este valor colocaria a saída do arranjo dentro de sua curva de potência por tensão e, conseqüentemente, os efeitos que estes teriam na análise dos resultados.

Para a realização deste experimento, primeiro foi necessário medir o tempo que a temperatura de superfície dos módulos precisa para que possa entrar em regime permanente. Para isto, o procedimento realizado foi colocar o refletor no ângulo ótimo, então ligar a luminária e observar a temperatura, marcando-se o tempo até que ela atingisse um valor estável.

Assim, com este resultado, decidiu-se utilizar um total de 45 minutos para realização do ensaio, o que corresponde a um tempo suficiente para a estabilização da temperatura e observação clara de todas as grandezas medidas e seu comportamento com o aumento da temperatura.

O próximo passo foi encontrar a relação entre a tensão e corrente de saída do arranjo e o ângulo de inclinação do refletor. Esta relação foi obtida por um experimento em que se mediu a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito do refletor primeiro sem o uso do refletor e com o refletor e com seu ângulo de inclinação variando de 10° até 60° em passos de 10° , sendo realizadas medições a cada passo.

Para cada medição, houve um controle de temperatura durante a realização das medições para que fossem tomadas apenas com a temperatura de superfície dos módulos em torno de 25°C . Este controle foi realizado de forma *on-off* manual, ligando e desligando a luminária ao mesmo tempo que a temperatura era acompanhada.

Então, os resultados dos experimentos foram contrastados a fim de entender se a proposta é factível, isto é, se as perdas pelo aquecimento em função do uso do refletor no ângulo ótimo são maiores que os ganhos causados pelo mesmo e, em caso positivo, se esta relação de ganhos e perdas ocorre de tal forma que o controle do ângulo de inclinação do refletor para conter este aquecimento poderia encontrar um ponto de aumento de eficiência se comparado ao uso do refletor fixo no ângulo ótimo.

3.2.2.1 *Tentativa de Controle Manual*

Uma tentativa de implementação manual da proposta foi realizada a fim de confirmar o que encontrado da análise dos experimentos. Essa tentativa consistiu na repetição do procedimento realizado para medir a relação entre potência e temperatura, porém com a alteração do ângulo do refletor durante o processo para observações de seus efeitos.

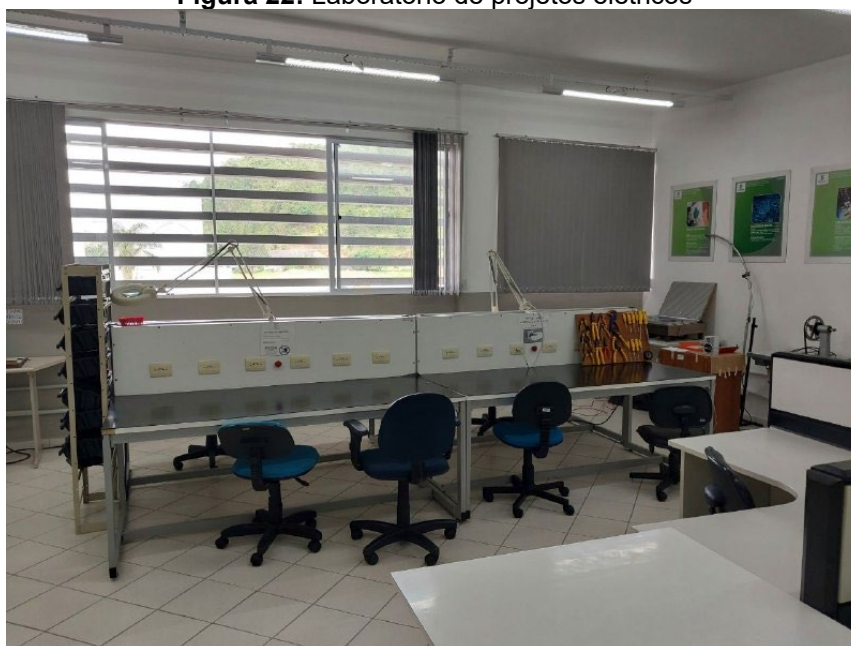
No início do experimento, o refletor foi ajustado para um ângulo inclinação de 60° e então a luminária foi ligada e a temperatura foi observada. Quando o arranjo atingiu um valor de 45 °C, valor próximo ao nominal do arranjo, o ângulo foi reduzido para 55°, continuando a observação acerca da saída e da temperatura de superfície do arranjo até a estabilização da temperatura, que ocorreu dentro do tempo de 45 minutos.

A observação dos resultados e sua análise com base no que já fora encontrado anteriormente permitiu a conclusão ao estudo da possibilidade de controle de temperatura indireto, conforme é explanado na seção de resultados adiante.

3.2.3 *Investigação do Aumento de Eficiência por Rastreamento de Ângulo Ótimo*

Este estudo se utilizou dos resultados do experimento para obtenção da relação entre a saída dos módulos e o ângulo de inclinação e de mais dois experimentos que foram realizados dentro do estudo. O primeiro foi a mensuração da relação entre a saída do arranjo (tensão e corrente) e o ângulo de incidência da luz sem o uso do refletor e o segundo foi a mensura da relação entre a saída dos módulos e o ângulo de incidência da luz com o refletor posto no ângulo ótimo para cada ângulo de incidência em que foram realizadas as medições.

Devido a questões administrativas do campus, o protótipo e todo o equipamento foram transferidos para o laboratório de projetos elétricos (labPROJ), onde este estudo e a subsequente implementação do rastreador foi realizado.

Figura 22: Laboratório de projetos elétricos

Fonte: Foto de autoria própria.

Os experimentos foram realizados entre as 13:00 e 16:00, tal como na etapa anterior, porém as luzes foram mantidas ligadas e a janela foi mantida semiaberta em todos os experimentos por conta de o laboratório ser utilizado por outros discentes durante a realização dos experimentos. A persiana na porção da janela que estava na lateral do protótipo foi mantida fechada em todos os experimentos.

O primeiro passo executado no estudo foi obter a curvas da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito em função do ângulo de incidência da luz da luminária de arco sem efeito do refletor.

O experimento realizado para tal consistiu em colocar o refletor em 10° , cobri-lo com um pano preto, então ligar a luminária com o ângulo de incidência da luz em 30° e varrer a faixa de ângulos de incidência de 30° a 90° em passos de 10° , tomando medições da tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e iluminância a cada passo.

O segundo ensaio consistiu na repetição do procedimento utilizado com o primeiro, porém com o uso do refletor e com um passo adicional em que, antes da realização das medições, buscou-se o ângulo ótimo, isto é, o ângulo de maior rendimento dos módulos, no qual o refletor foi fixado antes da realização da mensuração.

A busca foi feita de forma manual, movendo o refletor por meio do sistema mecânico. Para cada passo, primeiro foi realizada uma varredura gradual partindo de

20° para o primeiro passo e do ângulo ótimo anterior nos seguintes, a fim de identificar o ponto de pico, observando-se o valor da corrente de curto-circuito por esta ser mais sensível às variações de luminosidade sobre o arranjo. Uma vez identificado, retornava-se de forma gradual ao ponto em que houve a medição do maior valor de corrente e a medição era realizada.

Além das grandezas medidas no experimento anterior, o ângulo de inclinação do refletor encontrado como ótimo também foi medido com objetivo de estudar a relação entre este ângulo e o ângulo de incidência da luz.

A viabilidade da proposta foi atestada pela comparação dos resultados destes dois experimentos, comparando os valores de tensão e corrente obtidos em ambos, observando se há um ganho consistente no rendimento do arranjo pelo uso do refletor no ângulo ótimo que justificaria a implementação de um rastreador.

3.2.3.1 Implementação do Rastreador

Uma proposta de rastreador de ângulo de inclinação ótimo foi projetada e implementada devido aos resultados obtidos nos estudos anteriores terem se mostrado promissores.

O projeto do rastreador e as escolhas quanto aos métodos e modelos usados por este foram decididos com base nos resultados dos experimentos anteriores e o conhecimento prévio do sistema estudado.

O primeiro problema do desenvolvimento ao qual se buscou solução foi a medição do ângulo de incidência da luz, para que este pudesse ser utilizado para escolher o ângulo ótimo em um dado momento e, conseqüentemente, mover o refletor até este ângulo. Todavia, não foi obtido êxito na confecção deste sensor, nem havia opções de baixo custo à disposição no mercado para esta finalidade e compatíveis com um Arduino.

Inicialmente, buscou-se o projeto de um controlador *fuzzy* para a implementação do rastreador. Contudo, durante o desenvolvimento do rastreador, essa ideia original foi substituída por um rastreador que utiliza um algoritmo do tipo *hill-climbing*.

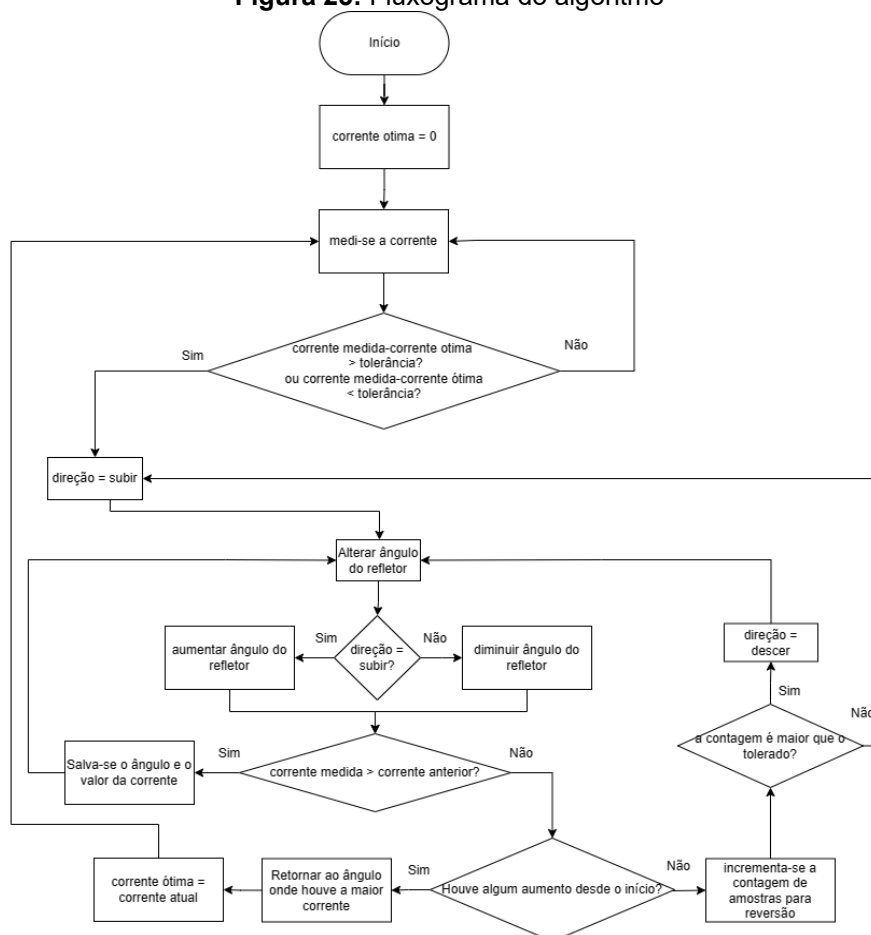
Esta mudança se deu em virtude de uma série de razões: a natureza do problema, que é um problema de otimização e maximização; a simplicidade deste tipo

de algoritmo e a facilidade em implementá-lo e a dificuldade em confeccionar um sensor preciso para medir o ângulo de incidência da luz, o que dificultou o uso desta grandeza como entrada do controlador *fuzzy*.

Além disso, a curva de corrente e potência em função do ângulo de inclinação do refletor também é adequada a este tipo de algoritmo por não conter máximos locais, mas sim um único máximo global no ponto de ângulo ótimo.

O algoritmo desenvolvido, o qual pode ser visto no fluxograma da Figura 23, segue as técnicas de algoritmos *hill-climbing*, apenas as adaptando às especificidades do rastreador. Seu funcionamento consiste em buscar o ponto de corrente máxima, realizando pequenas mudanças no ângulo de inclinação do refletor e avaliando o resultado no valor da corrente de saída.

Figura 23: Fluxograma do algoritmo



Fonte: Fluxograma de autoria própria.

Caso tenha havido um aumento de corrente após uma pequena mudança no ângulo de inclinação do refletor, o valor de corrente atual e o valor do ângulo de inclinação do refletor correspondente são salvos e uma nova mudança no mesmo

sentido (aumento ou diminuição deste ângulo) é realizada e o procedimento é repetido.

Caso contrário, se houve uma sucessão de aumentos antes da diminuição do valor da corrente, o rastreador buscará o ponto de máxima corrente, retornando assim ao ponto de pico. Porém, caso nenhum pico tenha sido atingido, após uma sucessão de quedas de corrente o sistema recomeça o procedimento do rastreador revertendo a direção do movimento.

Uma vez que o pico é encontrado, o rastreador repousa neste ponto até ocorra uma variação, aumento ou diminuição, do valor da corrente de saída do arranjo maior que um valor mínimo de tolerância, o qual foi escolhido de forma empírica. Ocorrida esta variação, o procedimento de busca é reiniciado para encontrar o pico da curva de corrente. Assim que o rastreador é ligado, é realizada uma busca inicial, utilizando o algoritmo para buscar a posição ótima do refletor.

Para o desenvolvimento e teste do rastreador em todas as suas etapas, usou-se o valor da corrente de curto-circuito como a grandeza que se buscava maximizar. A corrente foi escolhida por ter uma variação mais significativa em função de uma variação na radiação sobre o arranjo.

Em contraste com o que foi feito nos experimentos anteriores, uma média móvel de 20 amostras foi utilizada para a medição da corrente de saída para lidar com a oscilação na medição de corrente que causava instabilidade no funcionamento do algoritmo.

Um relé foi adicionado ao circuito do Arduino e do arranjo fotovoltaico de forma a automatizar a troca entre circuito aberto e curto-circuito e, assim, facilitar todo o processo de testes e medições com o rastreador.

Foram realizados alguns testes e ensaios para avaliar o funcionamento do rastreador e identificar melhorias a serem realizadas ou defeitos a serem corrigidos. Dentre eles, houve dois principais. O primeiro deles consistiu em realizar incrementos de 30° no ângulo de inclinação do refletor, partindo-se do ângulo de 30° , observando o comportamento do refletor e suprimindo-se a busca inicial pelo ângulo ótimo. O ângulo em cada passo foi mantido por 4 minutos a fim de se observar quaisquer possíveis instabilidades no funcionamento do rastreador.

A capacidade do rastreador de encontrar o ângulo ótimo, mesmo caso o ângulo de inclinação no início da busca seja maior que o ótimo foi também testada em um outro ensaio, em que o ângulo do sistema era iniciado com o ângulo de incidência em

70°, esperava-se a busca inicial, então o ângulo de inclinação era reduzido para 50°, então se observava se o rastreador fazia corretamente a rotina de buscar o ângulo ótimo, primeiro incrementando o ângulo de inclinação e realizando medidas da corrente, então revertendo a direção do movimento e passando a reduzir o ângulo quando o algoritmo percebe que a corrente está decaindo.

Por fim, outro ensaio foi utilizado para avaliar o desempenho e o ganho do rastreador. Este consistiu em ligar a luminária com o ângulo de incidência solar em 30° e o refletor em aproximadamente 25°. Então, o rastreador era iniciado e mantido em pleno funcionamento durante o restante do ensaio.

A cada 4 minutos, o ângulo de incidência era aumentado em 10° e se observava o funcionamento do rastreador, verificando se ele alcançava o ângulo ótimo e se ele se mantinha neste ângulo após alcançado. Foram realizadas medições da tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e do ângulo de inclinação do refletor a cada 4 segundos.

Os resultados obtidos foram usados para estimar o consumo do motor durante a realização do experimento, para comparar o rendimento do arranjo com o sistema rastreador e o rendimento do arranjo sem ele e para avaliar o quão bem-sucedido o rastreamento foi e qual foi a relação de aumento de eficiência de seu uso.

3.2.3.2 Estimativa do sistema ao longo do dia

Os resultados obtidos nos experimentos realizados com o sistema do arranjo fotovoltaico e o refletor com o rastreamento do ângulo ótimo, considerando as perdas causadas pelo motor, mostraram uma relação de melhores resultados quanto maior o espaço de tempo entre as etapas de acionamento do sistema de rastreamento e, conseqüentemente, o acionamento do motor.

Assim, buscou-se explorar outros cenários com maior tempo de duração das etapas de estabilidade. Devido à natureza do sistema, com resultados estáveis e predizíveis, decidiu-se realizar este estudo utilizando-se de uma análise matemática dos resultados, estimando-se a curva de potência e de geração e consumo de energia para um ensaio de mesmo procedimento que o ensaio realizado para avaliar o desempenho do sistema de rastreamento, porém com intervalos de tempo maiores para cada etapa.

Assim, para identificar qual seria o tempo de intervalo a ser utilizado em cada etapa, usou-se dados da trajetória solar, a fim de identificar quanto tempo leva para o ângulo de elevação do sol variar 10° .

Os dados foram obtidos pelo *software Analysis SOL-AR*, do laboratório de eficiência energética em edificações da Universidade Federal de Santa Catarina. Este *software* faz o cálculo da carta solar para uma determinada latitude, pela qual pode-se encontrar o ângulo de elevação do sol durante sua trajetória.

Para obtenção dos dados, usou-se a latitude da cidade de Florianópolis, por ser uma das cidades configuradas no programa, e a data de 22 de dezembro de 2023 por ser a data com maior variação no ângulo de elevação do sol e com elevação mais alta.

O valor da corrente da potência de saída do arranjo fotovoltaico para cada etapa foi calculado com base nos valores médios das amostras mensuradas durante cada etapa do ensaio que foi realizado para avaliar o desempenho do rastreador, excluindo-se as amostras dos momentos de transição em que o rastreador buscava o ângulo ótimo e o motor estava acionado.

Além disso, o tempo médio em que o motor ficou acionado durante as transições entre etapas do ensaio também foi medido a fim de ser utilizado para contabilizar a perda pelo uso do motor.

As curvas de estimativa da potência e da energia consumida e gerada foram calculadas por meio de um *script* escrito para um *software* de cálculos matemáticos e científicos.

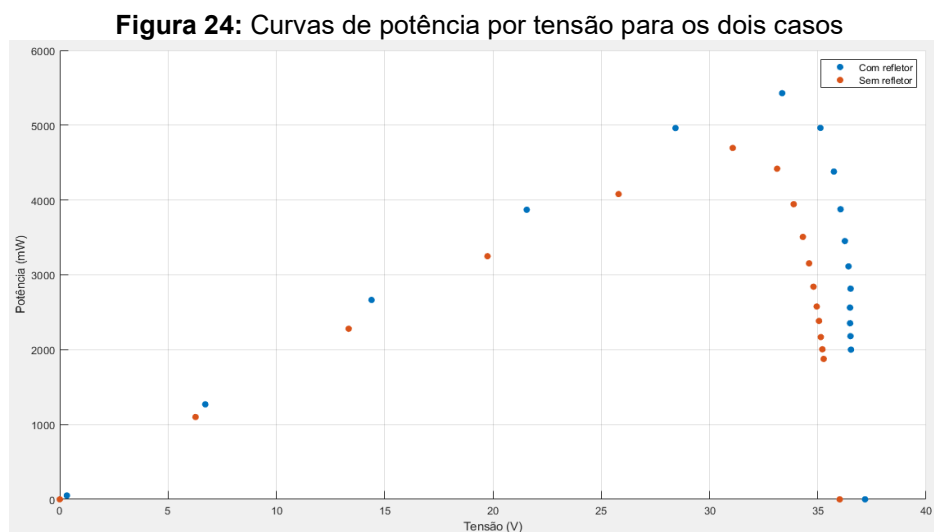
O *script* consistiu em criar as curvas das potências repetindo o valor médio da respectiva etapa pelo número de amostras correspondente ao tempo de duração da etapa e o tempo entre amostras, o qual foi de 4 segundos para todos os casos. No caso da curva de potência com uso do rastreamento, a potência gasta pelo motor, calculada com base nas medições realizadas para o ensaio para avaliação do desempenho do rastreador, foi subtraída da curva de potência gerada nas amostras ao final e início de cada etapa, com exceção do começo da primeira e fim da última. Após, a energia foi obtida integrando as curvas de potência em relação ao tempo, utilizando o tempo de amostragem como variação de tempo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados e as discussões conforme a parte do trabalho a qual se destinam.

4.1 Curvas de Potência X Tensão e Corrente Por Tensão

Na Figura 24 estão as curvas de potência por tensão dos módulos com e sem o uso do refletor. Pode-se ver o formato característico desta curva e a evolução do ganho de potência, que atinge seu maior valor no ponto de máxima potência.

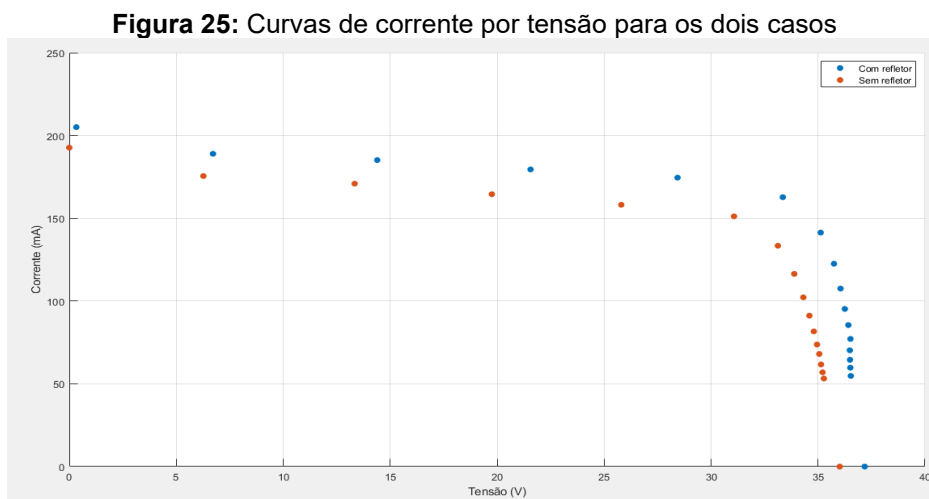


Fonte: Gráfico de autoria própria.

Para o caso dos módulos sem o uso do refletor, a curva atinge 4696 mW no seu ponto máximo em 31,07 V e que também ocorreu quando a carga estava configurada para 250 Ω . A tensão de circuito aberto ficou em 36,01 V.

Já para a curva dos módulos com o refletor no ângulo ótimo, a potência máxima alcançada é de 5428 mW, que ocorre na carga de 250 Ω e na tensão de 33,35 V, e a tensão de circuito aberto alcançada é 37,18 V.

A Figura 25 mostra as curvas de corrente por tensão, que servem para encontrar o ponto conhecido como o “joelho” da curva, onde há uma alteração brusca na taxa de decaimento da corrente em função do aumento da tensão, e que é o ponto de máxima geração de potência do arranjo.



Fonte: Autor.

Com o uso do refletor, este ponto ocorre quando a corrente é 162,70 mA, enquanto sem o uso do refletor, a corrente neste ponto tem o valor de 151,10 mA. Quanto às correntes de curto-circuito, o valor alcançado com o refletor foi de 205 mA, enquanto sem o refletor foi de 192,70 mA.

Considerando os produtos das tensões de circuito aberto e correntes de curto-circuito, valores que foram usados para avaliar o desempenho do protótipo posteriormente, o resultado com uso do refletor foi de 7621,90 mW e sem o uso do refletor foi de 6939,13 mW.

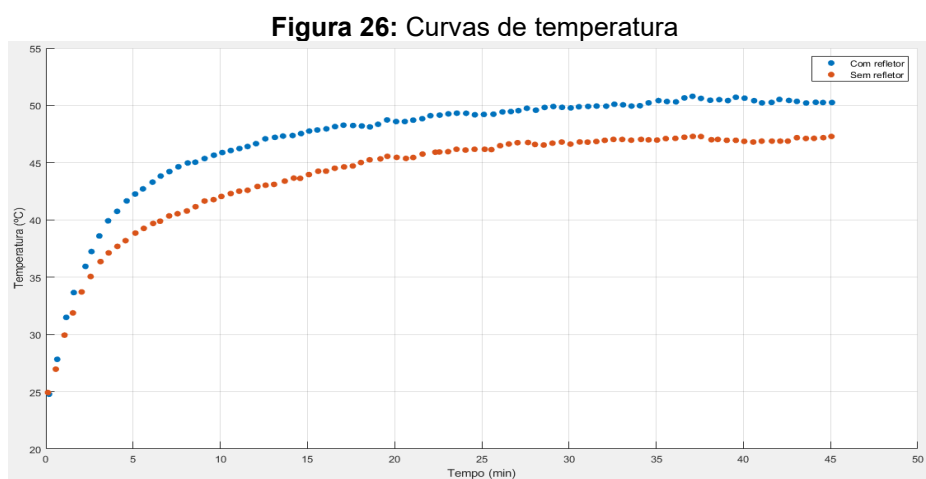
4.2 Investigação do Aumento de Eficiência por Controle Indireto da Temperatura

Os resultados do experimento apresentado na seção 4.1 seguiram o que lhes era esperado, conforme o que é descrito na literatura. A eficiência do arranjo fotovoltaico decaiu, à medida que sua temperatura subia por conta da irradiação sobre elas, de forma que a tensão de circuito aberto teve seu valor reduzido de forma aproximadamente linear em função do aquecimento, ao passo que a corrente de curto-circuito teve uma variação insignificante.

A relação entre a saída do arranjo e o aumento de irradiação causado pelo uso do refletor também apresentou o comportamento esperado, visto que a tensão de circuito aberto mostrou um pequeno aumento, quase desprezível, entre os dois casos.

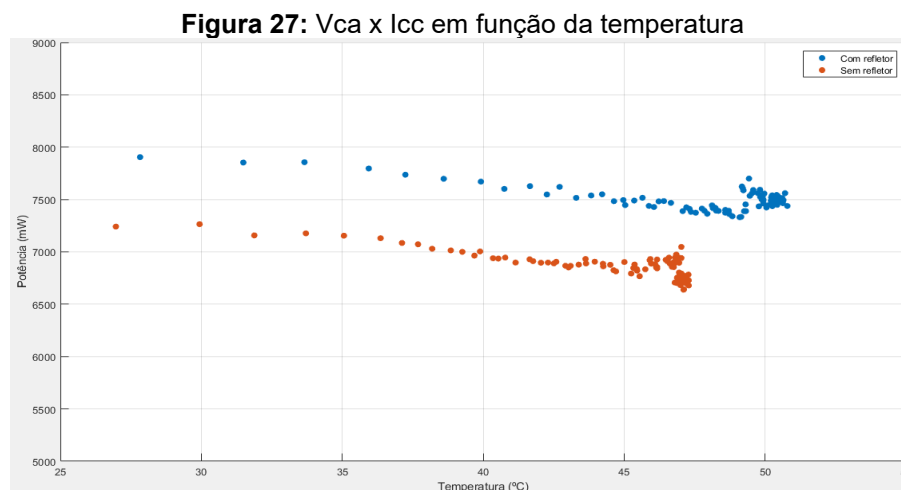
Em outras palavras, a corrente de curto-circuito aumentou de forma significativa em relação ao aumento da irradiação em ambos os casos.

Em ambos os casos, a temperatura de superfície dos módulos estabilizou até o fim dos experimentos, ambos em torno dos 5 minutos finais. A temperatura final com o refletor no ângulo de inclinação ótimo ficou em tornou de 50,24 °C, ao passo que no segundo caso ela ficou em 47,18 °C, uma diferença de 3,06 °C de aquecimento por conta do uso do refletor. A temperatura inicial em ambos os casos era aproximadamente 25 °C, temperatura ambiente do laboratório no dia em que o experimento foi realizado. Esses resultados são representados na Figura 26.



Fonte: Autor.

Os produtos da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito de ambos os dois casos apresentam um comportamento aproximadamente linear em relação ao aumento de temperatura, como pode ser visto na Figura 27.



Fonte: Autor.

Por meio destas curvas, é possível estimar um coeficiente de perda por aumento de temperatura, de forma a estimar a queda de potência devido a um aumento na temperatura dos módulos e, assim, comparar este valor com o que será apresentado em experimentos posteriores quanto à relação de ganho pelo uso do refletor e, assim, concluir a viabilidade da primeira proposta.

O cálculo para obtenção deste coeficiente é, de forma simples, o quociente da variação da saída do arranjo entre o início e o fim do experimento e da variação de temperatura correspondente neste mesmo intervalo, com resultado sendo dividido pela potência inicial, de forma que seja possível calcular o quanto foi perdido pelo aumento de temperatura independentemente do valor inicial de potência, o qual também depende da irradiação. Esta fórmula está explicitada na Equação (18).

$$K_T = \frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{P_{final} - P_{inicial}}{P_{inicial}(T_{final} - T_{inicial})} \quad (18)$$

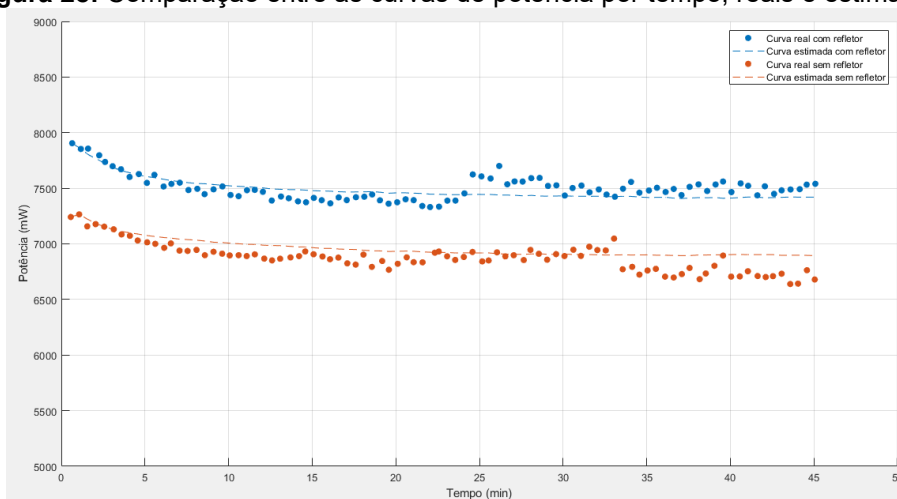
A Tabela 01 resume os resultados para cada curva e o valor médio entre elas, o qual será tido como a estimativa do valor para cálculos e comparações posteriores. O cálculo é feito usando a equação (18) e o primeiro e último valor de cada caso e o valor médio é feito com a média dos outros dois.

Tabela 01: Coeficientes de perda calculados

| Caso | Coefficiente (%/°C) |
|--------------------------|---------------------|
| Refletor no ângulo ótimo | -0,2061 |
| Sem Refletor | -0,3819 |
| Valor médio | -0,2940 |

Fonte: Tabela de autoria própria.

Como comparação e comprovação dos resultados obtidos, pode-se comparar a curva obtida estimando a potência ao longo do experimento por meio de seu valor inicial, as leituras de temperatura, o coeficiente médio e a curva dos valores medidos, vendo-se que seguem o mesmo padrão e têm valores próximos, como observado na Figura 28.

Figura 28: Comparação entre as curvas de potência por tempo, reais e estimadas

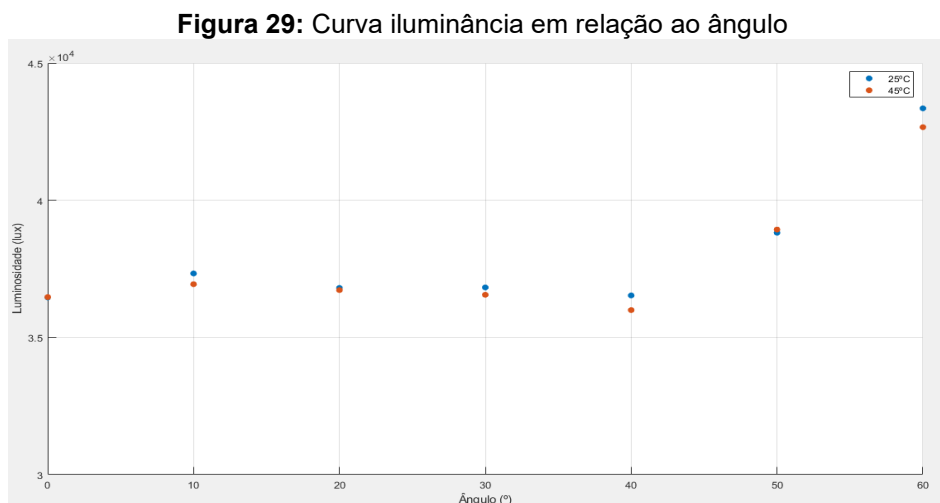
Fonte: Autor.

Por meio do coeficiente de perda, é possível estimar a perda decorrente do aquecimento causado pelo uso do refletor e assim comparar essa perda com os resultados da curva e ganho de rendimento causado pelo uso do refletor em função de seu ângulo, assim descobrindo a viabilidade da proposta.

Considerando que o aumento de temperatura foi de 3,06 °C por consequência do uso do refletor, tem-se que houve uma redução de aproximadamente 0,9% (0,2940 %/graus celsius * 3,06 graus celsius) em relação ao que seria obtido com a mesma irradiação que a obtida pelo uso do refletor, porém sem o aumento de temperatura.

A curva de potência por ângulo de inclinação do refletor seguiu aproximadamente o que lhe era esperado pelo modelo matemático, tendo a iluminância sobre o arranjo pouco aumento entre os casos sem uso do refletor e com

ele em uma inclinação de 40° e então, vê-se um aumento súbito até o ângulo de 60°, como pode ser visto na Figura 29.



Fonte: Autor.

O comportamento da saída do arranjo também seguiu este comportamento, com um pequeno aumento da tensão de circuito aberto e um grande aumento da corrente de curto-circuito.

Tabela 02: Potências e ganhos por ângulo de inclinação

| Ângulo de inclinação (°) | Potência medida (mW) | Ganho (mW) | Ganho (%) |
|--------------------------|----------------------|------------|-----------|
| 0 (sem refletor) | 7159,5 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | 7231,0 | 71,6 | 1,0 |
| 20 | 7209,6 | 50,1 | 0,7 |
| 30 | 7338,3 | 178,8 | 2,5 |
| 40 | 7300,5 | 141,1 | 2,0 |
| 50 | 7545,1 | 385,6 | 5,4 |
| 60 | 7903,5 | 744,0 | 10,4 |

Fonte: Tabela de autoria própria.

Pela Tabela 02, vê-se que o ganho fica entre 0,7 % e 2,5 % entre os ângulos de 10° e 40° e então tem um aumento abrupto de valor, atingindo 5,39 % em 50° e 10,39 % em 60°.

Comparando então os resultados dos dois casos, vê-se que os ganhos obtidos pelo uso do refletor quando a temperatura é constante muito ultrapassam as perdas ocasionadas colateralmente por conta do aumento de temperatura que ocorre pelo uso do refletor ao longo do tempo. Ou seja, a diminuição do ângulo do refletor causaria

uma diminuição da potência gerada pelos módulos que não seria compensada pela diminuição da temperatura de suas superfícies, assim inviabilizando a ideia.

Todavia, como uma prova final e como demonstração, decidiu-se realizar uma tentativa de controle manual, variando o ângulo de inclinação de forma a conter o aquecimento do arranjo e, com isso, observar o que seria o comportamento do arranjo em decorrência dessa variação.

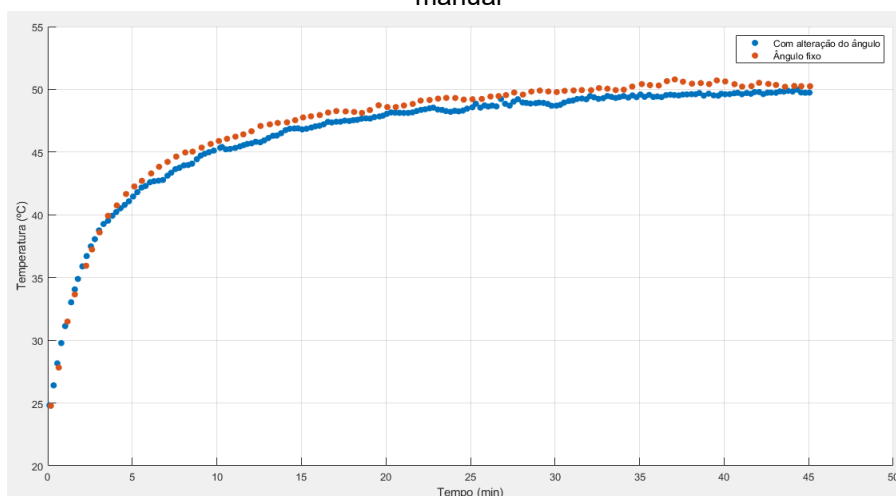
4.2.1 Controle Manual

O experimento de controle manual e seus resultados representam uma síntese prática de todo o estudo feito sobre as relações de ganhos e perdas pelo uso de refletores e seu efeito no aumento da temperatura dos módulos fotovoltaicos.

O ângulo de inclinação do refletor foi reduzido em torno de 4° , caindo de 60° para aproximadamente 56° , o que ocorreu por volta de 9 minutos e 49 segundos. Embora a redução tenha sido de um valor pequeno, seus efeitos foram sentidos nas medições, podendo-se utilizar os resultados deste ensaio para concluir esta etapa da investigação.

Assim que houve a redução do ângulo, a iluminância sobre o arranjo caiu de 43350 lux para 41550 lux, uma redução de 4,2 %. A corrente de curto-circuito reagiu imediatamente à esta redução, caindo de 206,3 mA para 201,6 mA, ao passo que a tensão de circuito aberto não se alterou de forma brusca, mas sim teve sua taxa de queda reduzida devido ao efeito sobre a temperatura.

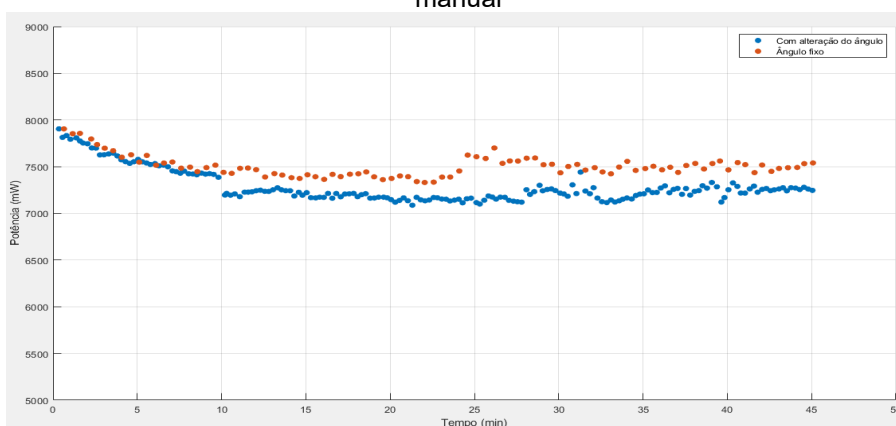
Figura 30: Curvas de temperatura dos módulos com o refletor fixo no ângulo ótimo e com o controle manual



Fonte: Autor.

Como visto na Figura 30, não houve um efeito de redução imediata da temperatura, mas sim uma redução no valor final alcançado, que foi 49,80 °C, uma redução de 0,44 °C em relação ao valor alcançado com o refletor fixo no ângulo ótimo.

Figura 31: Comparação de V_{ca} x I_{cc} entre o refletor fixo no ângulo ótimo e na tentativa de controle manual



Fonte: Autor.

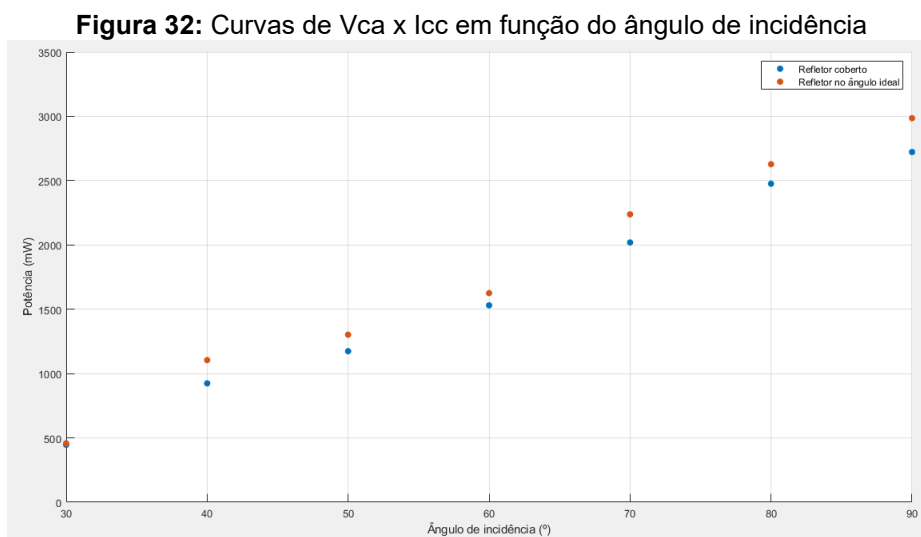
Por fim, como visto na Figura 31, a potência seguiu o comportamento da corrente, caindo de forma brusca de 7386 mW para 7196 mW, o que corresponde a uma redução de 2,6 %. Logo após a redução do ângulo, há uma atenuação da taxa de queda da potência, reflexo do que foi observado na curva de tensão.

No entanto, isso não foi o bastante para que a potência com o controle do ângulo ficasse acima da potência com o ângulo fixo, à medida que a temperatura se estabilizava, ou seja, a perda pela diminuição da reflexão é maior que a perda pelo aumento de temperatura.

4.3 Investigação do Aumento de Eficiência por Rastreo de Ângulo Ótimo

Em ambos os experimentos realizados neste estudo, a corrente de curto-circuito aumentou de forma significativa e aproximadamente linear com o aumento do ângulo de incidência, enquanto a tensão de circuito aberto apresentou pouca variação ao longo dos dois casos, com um ligeiro aumento de seu valor.

Dessa forma, o produto destas grandezas seguiu o comportamento da corrente e apresentou um aumento aproximadamente linear em função do aumento do ângulo de incidência da luz, como mostrado na Figura 32.



Fonte: Autor.

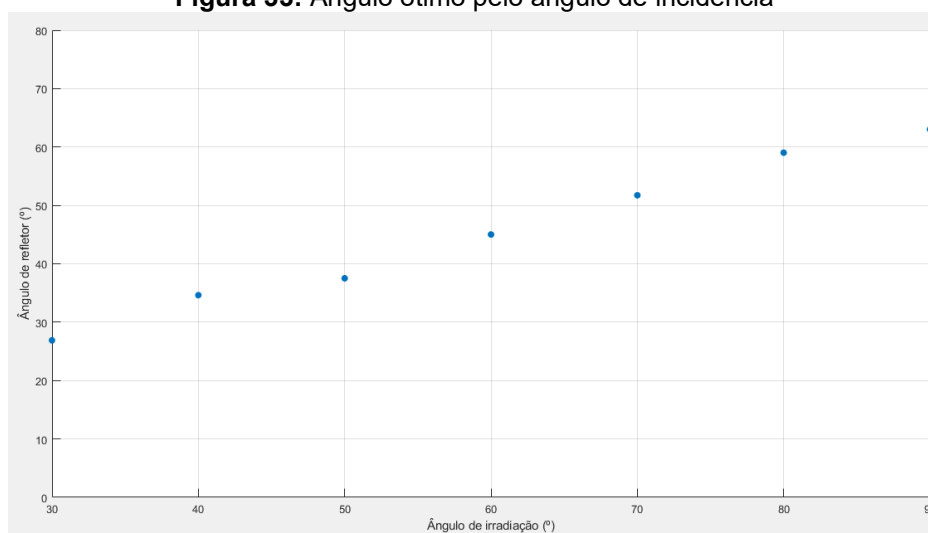
Analisando o ganho obtido pela colocação do refletor no ângulo de inclinação ótimo, conforme os valores apresentados na Tabela 03, nota-se um ganho consistente entre 6,1 % e 10,9 %, com exceção dos valores discrepantes de -2,4 % para o ângulo de incidência de 30° e 19,6 % para 40°.

Tabela 03: Potências e ganhos por ângulo de incidência

| Ângulo de incidência (°) | Potência sem refletor (mW) | Potência com refletor (mW) | Ganho (%) |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------|
| 30 | 466,6 | 457,2 | -2,4 |
| 40 | 924,2 | 1105,0 | 19,6 |
| 50 | 1174,1 | 1302,3 | 10,9 |
| 60 | 1530,5 | 1625,6 | 6,2 |
| 70 | 2019,3 | 2237,8 | 10,8 |
| 80 | 2475,7 | 2627,8 | 6,1 |
| 90 | 2722,4 | 2985,5 | 9,7 |

Fonte: Tabela de autoria própria.

Por fim, o ângulo ótimo também aumentou de forma linear em função do aumento do ângulo de incidência, como pode ser visto na Figura 33.

Figura 33: Ângulo ótimo pelo ângulo de incidência

Fonte: Autor.

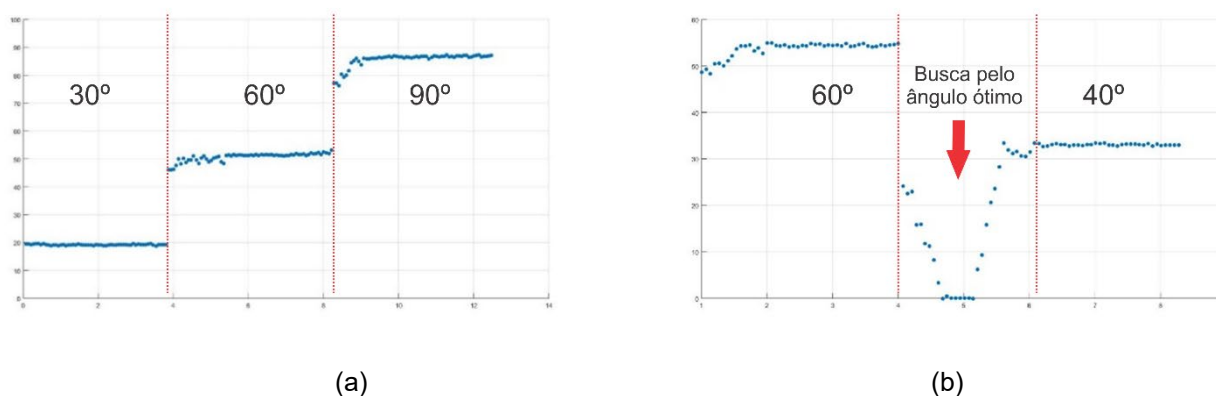
Considerando os resultados de ambos os experimentos, vê-se um ganho em decorrência da colocação do refletor em seu ângulo de inclinação ótimo e uma mudança deste ângulo ótimo, justificando implementar e avaliar um sistema rastreador que realize medições quanto às grandezas do sistema de geração para encontrar este ângulo ótimo e que mova o refletor até ele, de forma a aumentar o rendimento e a eficiência do sistema de geração fotovoltaica enquanto a incidência dos raios solares variam devido a posição do sol.

4.3.1 Rastreador de Ângulo Ótimo

O desempenho do rastreador pode ser avaliado pelos resultados obtidos nos diferentes ensaios ao qual foi submetido, avaliando-se tanto a sua capacidade de realizar adequadamente seu objetivo de encontrar o ângulo de inclinação ótimo quanto em relação ao ganho de energia do sistema.

Nas figuras 34(a), 34(b), vê-se as leituras do valor de corrente de saída do arranjo nos testes realizados durante o desenvolvimento do rastreador, ilustrando seu funcionamento.

Figura 34: Comportamento da corrente I_{cc} durante os ensaios x tempo



Fonte: Autor.

A Figura 34(a) mostra o rastreador submetido a grandes incrementos sucessivos ao valor do ângulo de incidência da luz e se observa o funcionamento do rastreador. O ângulo de incidência da luz é aumentado por volta de 4 minutos e, novamente, por volta de 8 minutos desde o início do ensaio. Isso provoca uma variação súbita no valor da corrente, fazendo com que o rastreador reaja iniciando uma busca e levando o refletor para o ângulo de inclinação ótimo.

Já a Figura 34(b) mostra um ensaio em que foram testadas as rotinas de busca inicial e a capacidade do algoritmo de rastrear um ângulo ótimo abaixo de seu ângulo no início da busca. Logo no começo, vê-se a corrente subir de um valor inicial, correspondente ao refletor posicionado em um ângulo de inclinação não ótimo para o ângulo de incidência de 60°, com o qual o ensaio foi iniciado.

Após algum tempo, aproximadamente aos 4 minutos, o ângulo é reduzido para 40°, observando-se a queda brusca no valor da corrente. Então o rastreador passa a

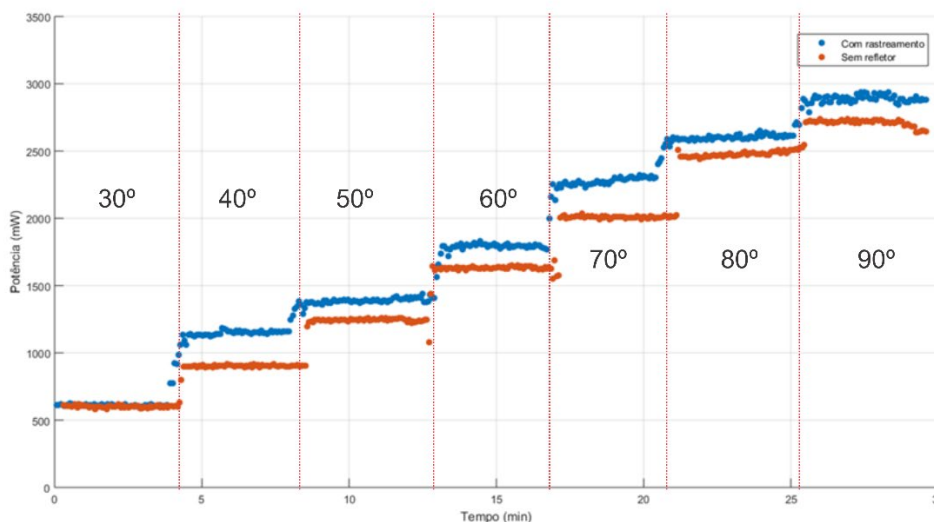
incrementar o valor do ângulo de inclinação e realizar medições da corrente. Passados alguns passos, visto que o valor da corrente apenas diminuiu desde o início da busca, o sentido do movimento é invertido, diminuindo-se o ângulo de inclinação a cada passo.

A partir deste ponto, segue-se a mesma lógica que as outras buscas, apenas com a diferença no sentido do movimento angular do refletor. Observa-se que o rastreador consegue encontrar o ângulo ótimo e se estabilizar nele.

O experimento utilizado para estudar o desempenho e a eficiência energética do rastreador pode ser visto na figura 35, em que se mostra tanto com o caso com o uso do rastreador quanto sem o uso do refletor.

O resultado do rastreamento pelo algoritmo pode ser visto na Figura 35, em que há as curvas da rotina de teste com o uso do refletor com o rastreamento e sem o refletor e sem rastreamento.

Figura 35: Curvas de V_{ca} x I_{cc} com rastreamento e sem uso do refletor



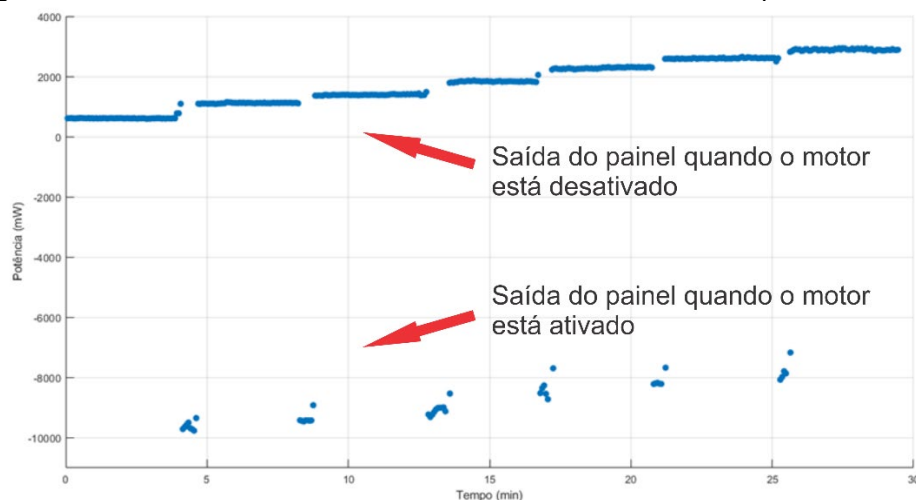
Fonte: Autor.

Os resultados mostram um ganho consistente pelo uso do rastreamento, ficando numa média de 11,05 % contando todo o experimento e tendo seu maior valor no ângulo de incidência de 40°, atingindo 26,2 %.

Considerando que a fonte que o alimenta tem uma tensão de 12 V e que foi medido um consumo de 900 mA de corrente no movimento subida do ângulo de inclinação, e 800 mA no movimento de descida, tem-se que há o consumo de 10.800 mW para aumentar o ângulo de inclinação do refletor, e 9.600 mW para diminuí-lo.

Com isso, tendo o registro do acionamento do motor, o qual foi salvo pelo Arduino durante as medições, pode-se estimar a eficiência real do sistema de rastreamento calculando a potência gasta pelo motor ao longo do tempo, e subtraindo as perdas do motor da potência gerada e, adicionalmente, pode-se calcular o total de energia gerada ao final de cada ensaio integrando a potência ao longo do processo.

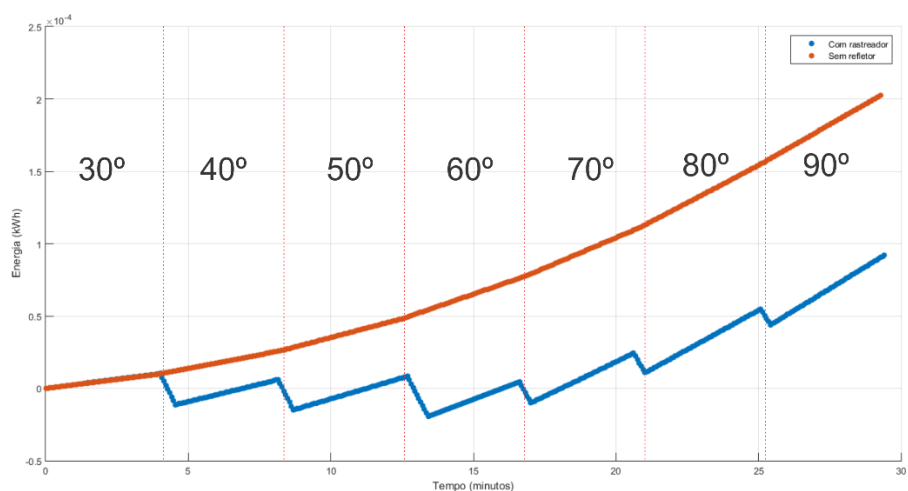
Figura 36: Curva de $V_{ca} \times I_{cc}$ com rastreamento considerando as perdas do motor



Fonte: Autor.

Na Figura 36, vê-se o efeito do consumo do motor na potência gerada pelo sistema com rastreamento, necessitando de uma potência maior que a que pode ser gerada pelo arranjo durante seu funcionamento, o qual corresponde a uma parte pequena de todo o ensaio, considerando o tempo necessário para o sistema atingir o ponto de repouso.

Figura 37: Curvas de energia gerada



Fonte: Autor.

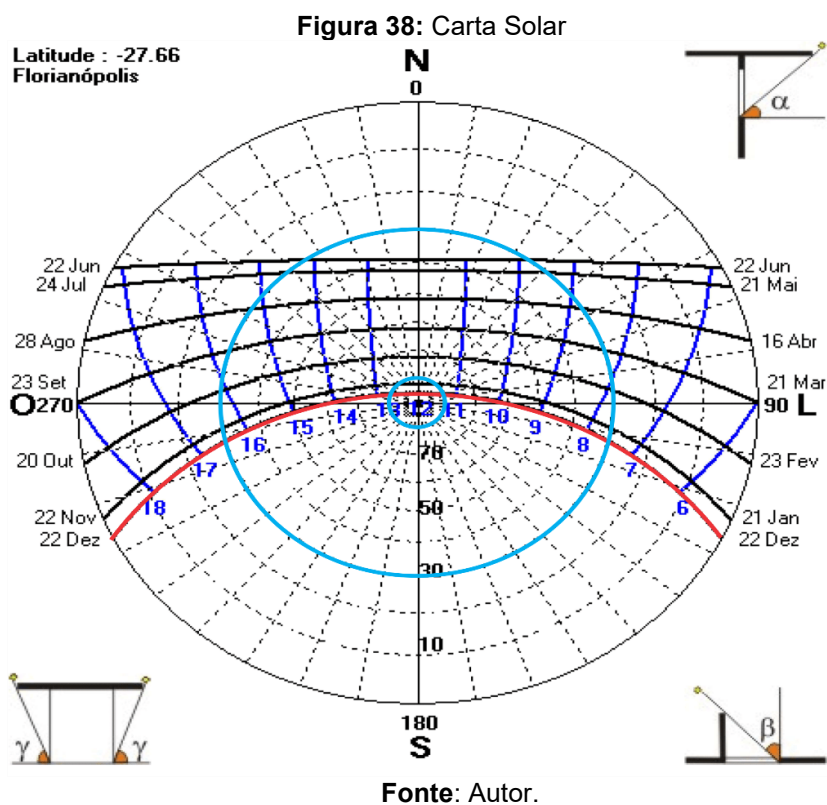
Por fim, na Figura 37 há uma estimativa da energia gerada pelo sistema com o uso do rastreador e sem o uso do refletor, que foi calculada multiplicando a potência medida em cada ponto pelo tempo entre as amostras e somando o valor ao valor de energia gerado até então.

Vê-se que o tempo em que o motor está em repouso não é o bastante para compensar as perdas por seu movimento durante o ensaio, de forma que a energia gerada pelo sistema com o refletor coberto e fixo em um ângulo baixo supera o que é gerado pelo sistema com o uso do rastreamento e com o uso do refletor, ainda que o tempo em que o motor seja acionado seja pequeno em relação ao todo.

4.3.2 *Estimativa do sistema ao longo do dia*

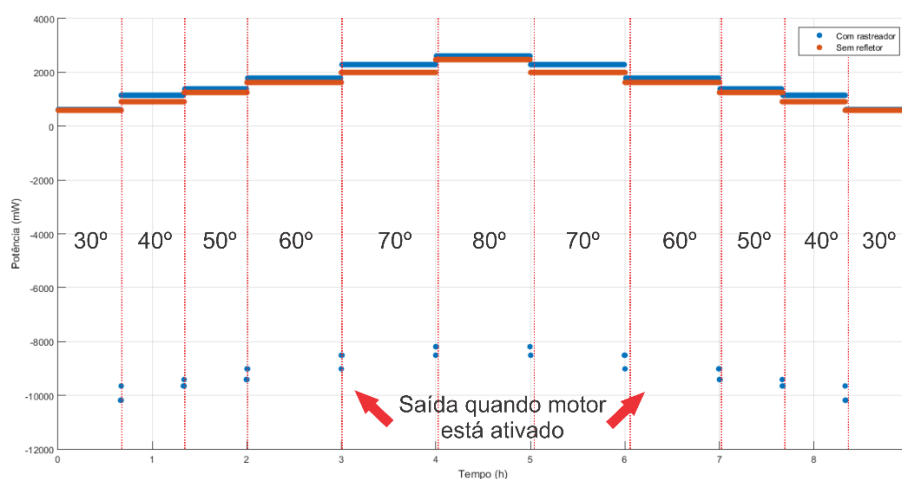
A carta solar para a latitude de Florianópolis ($-27,66^\circ$) para o ano de 2023, tal como calculada pelo *software SOL-AR* pode ser vista na Figura 38. Na Figura, vê-se a trajetória da data escolhida em uma linha vermelha e os círculos de ângulo de incidência da luz solar em 30° e 80° , respectivamente o menor e maior para a trajetória solar nesta data dentre os ângulos utilizados no ensaio para avaliação do desempenho do rastreador.

Pela carta, vê-se um intervalo de aproximadamente 40 minutos para o sol se variar entre 30° e 40° , entre 40° e 50° e entre 50° e 60° e aproximadamente 60 minutos para variar entre 60° e 70° , 70° e 80° e fica por aproximadamente 60 minutos próximo de 80° .

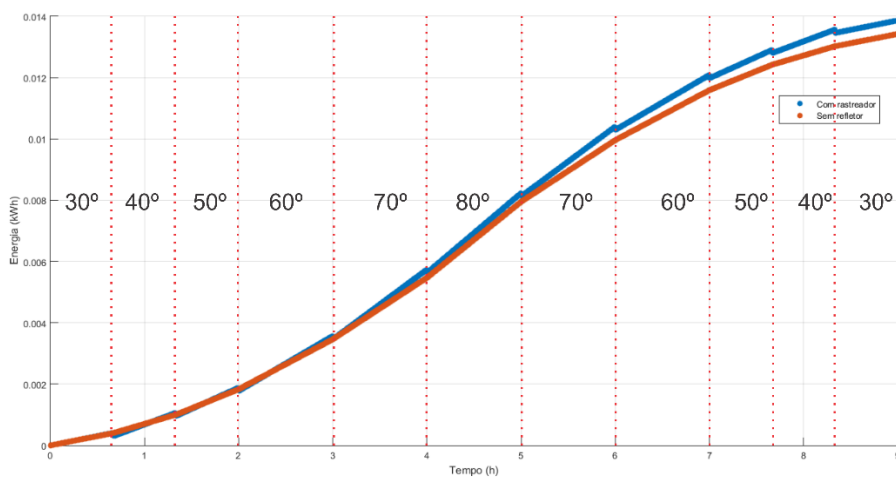


Na Figura 38, vê-se a curva das potências estimadas com rastreamento e sem uso do refletor. As curvas seguem os padrões e valores das Figuras 35 e 36, porém com um tempo maior para cada ângulo de incidência.

Figura 39: Curvas de potência estimadas



Na Figura 39, vê-se o resultado da integração das curvas na Figura 38, isto é, a energia gerada ou consumida. Nota-se que, até o quinto passo, a curva do sistema com rastreamento e sem refletor são muito próximas, porém com a curva da energia gerada pelo sistema com rastreamento gradualmente se sobrepondo a curva da energia do sistema sem o refletor.

Figura 40: Curvas de energias geradas estimadas

Fonte: Autor.

Do quinto passo em diante, vê-se que a curva da energia gerada pelo sistema com rastreador se mantém sobre a outra curva, ou seja, o intervalo de tempo maior entre as amostras, ao longo da duração do experimento, compensou as perdas causadas pelo uso do motor e se conseguiu um ganho na geração de energia.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo de todo o estudo possibilitaram um entendimento sobre as possibilidades de aumento do rendimento de sistemas de geração fotovoltaicos pelo uso de um refletor com controle do ângulo de inclinação.

Quanto ao estudo a respeito da possibilidade de ganho pelo controle indireto da temperatura, os resultados foram claros de que, para as condições e os módulos usados, esta possibilidade é inviável, pois o aumento de temperatura em consequência do uso do refletor e as perdas causadas por este aquecimento são inferiores aos ganhos obtidos pela colocação do refletor no ângulo ótimo, de tal forma que não há nenhum ponto ótimo que possa ser alcançado pela redução do ângulo de inclinação a partir do ângulo ótimo.

Uma revisão do estudo e dos resultados mostram a obtenção de um ganho provocado pela variação do ângulo de inclinação do refletor, com objetivo de realizar um controle indireto da temperatura, só seria possível se o arranjo fotovoltaico utilizado tivesse um coeficiente de perdas por temperatura de valor muito elevado, tal que as perdas pelo aumento de temperatura fossem superiores aos ganhos pelo aumento da irradiação. Assim, um estudo posterior seria repetir os passos deste estudo com outros modelos de módulos fotovoltaicos com coeficientes de perda maiores, caso existam tais módulos.

Considerando que todo o estudo foi feito em laboratório, uma segunda via de estudos posteriores seria confirmar se estes resultados se repetem no uso do arranjo em condições abertas e com insolação real.

A respeito do segundo estudo, conclui-se que há um aumento do rendimento do arranjo fotovoltaico por consequência do sistema de rastreamento do ângulo de inclinação ótimo, porém tal aumento não conseguiu compensar as perdas que são decorrentes do uso do motor responsável pelo movimento do refletor no experimento realizado. Todavia, na simulação por meio de um *script*, em que a duração de cada etapa do experimento foi aumentada, notou-se um ganho da energia gerada com o arranjo com o sistema de rastreamento em relação ao arranjo sem o uso do refletor, isto é, o ganho de potência acumulado ao longo do tempo compensou as perdas causadas pelo sistema mecânico.

Assim, esta possibilidade ainda não pode ser descartada como uma alternativa para aumento da eficiência de módulos fotovoltaicos, visto que ainda há margem para estudos dentro desta linha de pesquisa.

Um ponto que pode ser observado é o fato de que todo o estudo foi realizado em laboratório com uso de lâmpadas, e que não foi possível, com o aparato que pode ser montado, alcançar a mesma irradiação que a iluminação natural, assim não sendo possível extrair todo o potencial de geração do arranjo. Dessa forma, seria interessante um estudo que investigue os resultados da colocação do refletor no ângulo ótimo e de um possível rastreamento em condições abertas e com insolação real.

Um outro ponto a ser melhorado é quanto aos módulos utilizados neste experimento, que são um par de módulos fotovoltaicos didáticos, cuja potência nominal é de 10W cada. Além disso, foi utilizada luz artificial para realização dos experimentos no laboratório. É possível que um módulo fotovoltaico comercial, de maior potência nominal e com o uso de luz solar em ambiente externo, consiga gerar energia suficiente para cobrir os custos energéticos do motor e produzir um ganho real de potência, ainda que, pelas dimensões maiores que um módulo comercial venha a ter, o motor necessário necessite uma potência maior para ser acionado e, assim, os custos energéticos sejam maiores.

Outro ponto é a utilização de dois refletores ao invés de um único, a fim de duplicar o efeito de aumento da irradiação sobre o arranjo e assim, aumentar o ganho proporcionado pelo sistema. Embora isto necessitaria de um sistema mecânico de maior consumo de energia, seja por um único motor de maior potência para o controle dos dois refletores, seja por meio de uso de dois motores sincronizados, é possível que o desempenho melhor do sistema de rastreamento com dois refletores compensasse a perda maior.

Por último, há a possibilidade de explorar outros métodos e técnicas para realizar o rastreamento, que podem reduzir o tempo gasto para atingir o ângulo ótimo e, assim, reduzir a energia necessária para atingir o ponto de ângulo ótimo e, possivelmente, produzir um ganho na energia gerada pelo sistema fotovoltaico.

Desta forma, pode-se concluir que ambos os estudos realizados durante o desenvolvimento deste trabalho servem como um estudo inicial sobre o uso de refletores com controle do seu ângulo de inclinação em sistemas de geração fotovoltaicos, abrindo caminho para trabalhos futuros dentro desta linha de pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

ALIBABA (China) (comp.). **Motor de passo nema17 de 1.8 graus, motor de passo 2 fase 42mm/JK42HS40-1004AC**. Disponível em:

<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/1-8-degree-2-phase-NEMA17-60303783793.html>. Acesso em: 27 jun. 2022.

ALPS ALPINE. **RK097**. Disponível em: <https://br.mouser.com/datasheet/2/15/RK097-1370742.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2022.

ANAND, V. P. *et al.* Performance improvement of solar module system using flat plate reflectors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ELECTRICAL ENGINEERING, 2014., 2014, Vellore. **2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)**. [S.L.]: Ieee, 2014. p. 1-4.

Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6838547>. Acesso em: 29 jul. 2022.

BHATIA, S. C.; GUPTA, R. K.. **Textbook of Renewable Energy**. Nova Delhi: Woodland Publishing, 2018. 335 p.

BHUVANENDRAN, Abhiram *et al.* Efficient Photovoltaic Solar Panel with Mirror Actuation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTING, COMMUNICATIONS AND INFORMATICS, 1., 2018, Bangalore. **International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics**.

Bangalore: Ieee, 2018. p. 1218-1221. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8554453>. Acesso em: 12 ago. 2022.

BOUAKKAZ, Mohammed Salah; BOUKADOUM, Ahcen; BOUDEBBOUZ, Omar. Fuzzy Logic based Adaptive Step Hill Climbing MPPT Algorithm for PV Energy Generation Systems. **0 International Conference On Computing And Information Technology**. Tabuk, p. 1-5. set. 2020. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9213737>. Acesso em: 15 jan. 2023.

CAETANO, Daniel Lucas Zago *et al.* **Práticas de Óptica e Introdução à Física**

Moderna: coleta e análise de dados experimentais. Campinas: Cultura Acadêmica, 2014. 139 p. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/265686500_Praticas_de_Optica_e_Introducao_a_Fisica_Moderna_Coleta_e_Analise_de_Dados_Experimentais. Acesso em: 09 jul. 2022.

CDS. **CdS Photoconductive Cells**: gl5528. GL5528. Disponível em:

https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet_LDR.pdf. Acesso em: 26 jul. 2022.

DUTRA, Cynthia Beatriz Scheffer; RODRIGUES, Jean Paulo; SEDOR, Paulo César.

Capítulo 11: otimização da absorção de energia solar com o uso de placas

fotovoltaicas e refletores móveis. In: COTIAN, Luis Fernando Paulista (comp.).

Engenharias, ciências e tecnologias 3. Belo Horizonte: Atena, 2019. p. 157-166.

Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/01/E-book-Engenharias-3.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2022.

ECKSTEINIMG (Alemanha). **1.8° 42mm High Torque Hybrid Stepper Motor**.

Disponível em: <https://ecksteinimg.de/Datasheet/Schrittmotor/JK42HS40-1004A/JK42HS40-1004AC.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2022.

ELMEADAWY, M. I. *et al.* Impact of Reflectors on Photovoltaic Panel Performance.

Journal Of Soil Sciences And Agricultural Engineering. Almançoara, p. 851-856.

dez. 2019. Disponível em: https://jssae.journals.ekb.eg/article_79680.html. Acesso em: 29 jun. 2022.

FULL GAUGE CONTROLS. **Sensor SB-41**. Disponível em:

<https://www.fullgauge.com.br/produto-sensor-sb41>. Acesso em: 26 jul. 2022.

KASIM, Naseer; ATWAN, Ahmed; ELIEWI, Fadhil Muhmood. Improve the

performance of solar modules by reflectors. **Journal Of Physics**. Bagdad, p. 1-7.

fev. 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1032/1/012031>. Acesso em: 29 jun. 2022.

KIM, Moon Keun *et al.* Optimal Design Strategy of a Solar Reflector Combining Photovoltaic Panels to Improve Electricity Output: a case study in calgary, canada. **Sustainability**. Basel, p. 1-18. maio 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6115>. Acesso em: 12 set. 2022.

KOMAES. **Especificações Técnicas Módulo Solar Fotovoltaico**: km (p) 10 - 10w. S.I: Komaes, 2009. 1 p. Disponível em: <https://www.solarbrasil.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Datasheet-KMP10.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2022.

MCEVOY, Augustin; MARKVART, Tom; CASTAÑER, Luis. **Practical Handbook of Photovoltaics**: fundamentals and applications. Waltham: Elsevier, 2012. 1204 p.

MCGRATH, Matt. **Mudanças climáticas: os efeitos alarmantes sobre o mundo hoje, segundo novo relatório da ONU**. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-58146500>. Acesso em: 27 mai. 2022.

NASSIF, Rodrigo. **A crise hídrica e energética no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://ufop.br/noticias/em-discussao/crise-hidrica-e-energetica-no-brasil>. Acesso em: 27 mai. 2022.

NEJILA, V.P.; SELVAKUMAR, A. Immanuel. Fuzzy-Logic Based Hill-Climbing Method For Maximum Power Point Tracking In PV Systems. **International Conference On Power, Energy And Control**. Dindigul, p. 8-13. jun. 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6527614>. Acesso em: 15 jan. 2023.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A.. **Electric Circuits**. 10. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2015. 820 p.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (Brasília). **Geração de Energia**. 2022. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 29 maio 2022

PINDADO, Santiago; CUBAS, Javier. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function.

Energies. Basileia, p. 4098-4115. jul. 2014. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/271158300_Explicit_Expressions_for_Solar_Panel_Equivalent_Circuit_Parameters_Based_on_Analytical_Formulation_and_the_Lambert_W-Function. Acesso em: 22 ago. 2022.

PINSKY, Vanessa. **Aquecimento Global**: o que é, causas e consequências. O que é, Causas e Consequências. 2021. Disponível em:

<https://fia.com.br/blog/aquecimento-global/>. Acesso em: 27 mai. 2022.

RAWAT, Rahul; CHANDEL, S. S.. Hill Climbing Techniques For Tracking Maximum Power Point In Solar Photovoltaic Systems: a review. **F International Journal Of Sustainable Development And Green Economics**. Hamirpur, p. 90-95. fev. 2013.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/288128372_Hill_climbing_techniques_for_tracking_maximum_power_point_in_solar_photovoltaic_systems_-_A_review

REN21. **10 Years of Renewable Progress**. Paris: Ren21, 2015. 48 p. Disponível em:

https://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/Topical%20Reports/REN21_10_yr.pdf. Acesso em: 29 mai. 2022.

RESENDE, Isabelle. **Crise energética impulsiona setor de energia solar**. 2021.

Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/crise-energetica-impulsiona-setor-de-energia-solar/>. Acesso em: 25 jan. 2022.

RITCHIE, Hannah. **Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?**: globally, we emit around 50 billion tonnes of greenhouse gases each year. where do these emissions come from? we take a look, sector-by-sector..

Globally, we emit around 50 billion tonnes of greenhouse gases each year. Where do these emissions come from? We take a look, sector-by-sector.. 2020. Disponível em:

<https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>. Acesso em: 27 maio 2022.

RIZK, Jamal; NAGRIAL, Mahmood. Impact of Reflectors on Solar Energy Systems. **International Journal Of Electrical, Computer, Energetic, Electronic And Communication Engineering**. Penrith South, p. 743-747. maio 2008. Disponível em: <https://publications.waset.org/2761/impact-of-reflectors-on-solar-energy-systems>. Acesso em: 29 mai. 2022.

ROHWER-KAHLMANN, Malte. How solar energy got so cheap, and why it's not everywhere (yet). Youtube, 15 de janeiro de 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=sUvaYycoWql>. Acesso em: 29 mai. 2022.

RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. 4: beyond classical search. In: RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. **Artificial Intelligence: a modern approach**. 3. ed. Harlow: Pearson, 2016. p. 120-159.

SANDRI, Amábyle; BARRETO, Elis. Brasil aumentou em 121% emissões de CO2 por uso de termelétricas em 2021. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/brasil-aumentou-em-121-emissoes-de-co2-por-uso-de-termelétricas-em-2021/>. Acesso em: 29 mai. 2022.

SANT'ANA, Jéssica. **Governo eleva de R\$ 9 bi para R\$ 13 bi previsão de gasto com termelétricas; consumidor paga. 2021**. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/07/11/governo-eleva-de-r-9-bi-para-r-13-bi-previsao-de-gasto-com-termelétricas-consumidor-paga.ghtml>. Acesso em: 29 mai. 2022.

SOLAR BRASIL (Brasil). **Painel Solar Komaes**: informações técnicas. Informações técnicas. Disponível em: <https://www.solarbrasil.com.br/produtos/painel-modulo-fotovoltaico/painel-solar-komaes/>. Acesso em: 27 jun. 2022.

UNEP. O aumento alarmante da temperatura global. 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/o-aumento-alarmante-da-temperatura-global>. Acesso em: 27 mai. 2022.

UNIVERSIDADE DE MICHIGAN. **Photovoltaic Energy Factsheet**. 2021. Disponível em: <https://css.umich.edu/factsheets/photovoltaic-energy-factsheet>. Acesso em: 29 mai. 2022.

YOUNG, Hugh; FREEDMAN, Roger. **Sears and Zeemansky's University Physics**. 13. ed. San Francisco: Pearson Education, 2012. 1598 p.