



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO COMPARATIVO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA ENTRE
UM PAINEL FIXO E OUTRO COM RASTREAMENTO**

Jaquelinne de Godoi Souto

Brasília, Maio de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO COMPARATIVO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA ENTRE
UM PAINEL FIXO E OUTRO COM RASTREAMENTO**

Jaqueline de Godoi Souto

*Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro em Engenharia Mecânica*

Banca Examinadora

Prof. Mário Benjamim Baptista de Siqueira, Ph.D, _____
FT/UnB
Orientador

Prof. Guilherme Caribe de Carvalho, Ph.D, FT/UnB _____
Examinador Interno

Prof. Dario Gerardo Fantini, Me, FT/UnB _____
Examinador Interno

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUTO, JAQUELINNE

ESTUDO COMPARATIVO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA ENTREUM PAINEL FIXO E OUTRO COM RASTREAMENTO [Distrito Federal] 2022.

xvi, 83 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Mecânica, 2022).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

- | | |
|-----------------|--------------------|
| 1. Eficiência | 2. Rastreador |
| 3. Fotovoltaico | 4. Energia |
| I. ENM/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUTO, J. G. (2022). *ESTUDO COMPARATIVO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA ENTREUM PAINEL FIXO E OUTRO COM RASTREAMENTO*. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jaquelinne de Godoi Souto

TÍTULO: ESTUDO COMPARATIVO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA ENTREUM PAINEL FIXO E OUTRO COM RASTREAMENTO.

GRAU: Engenheiro em Engenharia Mecânica ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Jaquelinne de Godoi Souto

Depto. de Engenharia Mecânica (ENM) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por nunca ter me desamparado e por ter me dado saúde e resiliência para chegar até aqui. Agradeço também aos meus pais, Paulo e Ilda, que mesmo diante de tantas dificuldades, nunca mediram esforços para que eu estudasse e me proporcionaram tudo que eles não puderam ter. Agradeço ao meu irmão, Paulo Henrique, por sempre ter me apoiado e me ensinado tanto sobre a vida e o que realmente importa nela. Agradeço ao meu companheiro, Wesley, por todo o apoio ao longo de toda a faculdade, por ter sido minha base e minha sustentação nos momentos mais difíceis e por sempre ter me estendido a mão quando eu precisei. Agradeço ao meu colega e amigo, André Mariano, agora Engenheiro Mecatrônico, por ter abraçado esse projeto comigo e ter dado o seu melhor na execução dele. Agradeço a todos os amigos que fiz durante a faculdade, sem vocês essa jornada teria sido muito mais difícil. Agradeço ao meu orientador, professor Mário Siqueira, por toda ajuda, confiança, paciência e disponibilidade. E por fim, agradeço a todas as pessoas que passaram pelo meu caminho e me ajudaram a chegar até aqui: professores, técnicos, equipe de limpeza da universidade, equipe do restaurante universitário... Ninguém faz nada sozinho, o que dá sentido à nossa caminhada são as pessoas e as experiências que encontramos ao longo do caminho. Fica aqui o meu muito obrigada a todos vocês!

Jaquelinne de Godoi Souto

RESUMO

A expansão tecnológica está estritamente ligada ao consumo de energia elétrica, por isso, ao longo dos anos, o homem viu a necessidade de buscar novas alternativas de geração de energia e também de encontrar alternativas mais limpas e renováveis. Com isso, a energia solar fotovoltaica tem crescido muito no mercado mundial. O presente trabalho de conclusão de curso faz parte de um Projeto de Iniciação Científica (PIBIC), que foi desenvolvido com o auxílio de um colega do curso de Engenharia Mecatrônica, André Mariano, e tem como objetivo fazer uma análise comparativa de geração de energia entre um painel fotovoltaico fixo e um com rastreador solar na cidade de Brasília. Sabe-se que um sistema com rastreador recebe uma quantidade maior de radiação ao longo do dia, o que aumentaria a capacidade de geração do sistema e fornecimento de energia. Entretanto, quanto maior a radiação, maior é a temperatura atingida pelo painel, fazendo com que a eficiência diminua, dado que a tensão do sistema também diminui com o aumento da temperatura. A partir da análise bibliométrica de alguns autores sobre o tema, foi possível concluir que o sistema com rastreamento se sobressaiu na geração de energia em todas as situações analisadas, ou seja, apesar de os painéis com rastreamento terem atingido uma maior temperatura, o que poderia ter afetado o seu rendimento, a sua maior geração compensou as perdas que poderiam ser causadas pelo aumento da temperatura dos painéis. E nos resultados experimentais deste projeto, verificou-se que a incidência de radiação solar foi maior no painel com rastreamento, principalmente em períodos do dia em que o céu estava limpo e sem nuvens, o que favoreceu a geração de corrente e, conseqüentemente de potência, principalmente no começo e no final do dia. Já no período próximo ao meio dia, a radiação recebida pelos dois painéis foi muito próxima, sendo que o painel fixo teve um ganho de geração e potência em relação ao rastreador, que pode ser explicado pela temperatura atingida por este.

ABSTRACT

The expansion of technology is strictly connected to the consumption of electricity, therefore, over the years, mankind has seen the need to seek new alternatives for power generation and also to find cleaner and renewable alternatives. Hence, photovoltaic solar energy has grown a lot worldwide. The present end-of-course paper is part of a project (PIBIC), which was developed with the help of a colleague from the Mechatronics Engineering course, André Mariano, and has as its objective the comparative analysis of energy generation between a fixed photovoltaic panel and a solar tracker in the city of Brasília. It is known that a system with a tracker receives a greater amount of radiation throughout the day, which would increase the generation capacity of the system, and greater energy supply. However, the greater the radiation, the higher the temperature reached by the panel, causing the efficiency to decrease, since the system's voltage also decreases with the increase in temperature. From the bibliometric analysis of some authors on the subject, it was possible to conclude that the system with tracking excelled in energy generation

in all the situations analyzed, that is, although the panels with tracking have reached a higher temperature, which could have affected their performance, their greater efficiency compensated for the losses that could be caused by the increased temperature of the panels. The experimental tests in this work also confirmed the higher generation capacity of the tracker to the detriment of the fixed photovoltaic plate. And in the experimental results of this project, it was found that the incidence of solar radiation was higher in the panel with tracking, especially in periods of the day when the sky was clear and cloudless, which favored the generation of current and power, especially at the beginning and end of the day. In the period around midday, the radiation received by the two panels was very close, and the fixed panel had a gain in generation and power in relation to the tracker, which can be explained by the temperature reached by the tracker.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	5
1.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	RELAÇÃO DA TEMPERATURA COM A EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS	6
2.2	COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM PAINEL FIXO E COM RASTREADOR	11
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	ÓRBITA SOLAR	19
3.2	CARACTERÍSTICAS DO SOL	21
3.3	RADIAÇÃO SOLAR	21
3.3.1	APROVEITAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR	25
3.3.2	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR	26
3.4	GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	26
3.4.1	ESTRUTURA MICROSCÓPICA	28
3.4.2	ESTRUTURA MACROSCÓPICA	29
3.5	UTILIZAÇÃO DO MPPT PARA CONTROLE DE CARGA	30
3.6	TIPOS DE RASTREADORES SOLARES	32
3.6.1	RASTREADORES DE EIXO ÚNICO	32
3.6.2	RASTREADORES DE EIXO DUPLO	33
3.6.3	RADIAÇÃO COLETADA PELO PAINEL FIXO E PELO RASTREADOR	33
3.6.4	COMPORTAMENTO DOS PAINÉIS COM RELAÇÃO À TEMPERATURA E À RADIAÇÃO SOLAR	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	ANÁLISE MECÂNICA DO RASTREADOR	36
4.1.1	CÁLCULO DAS DISTÂNCIAS	38
4.2	RASTREAMENTO DO SOL	40
4.3	SISTEMA DE MEDIÇÃO	40
4.4	MATERIAIS UTILIZADOS	41
5	RESULTADOS	43
5.1	TESTE DO RASTREADOR	43
5.2	TESTE DE GERAÇÃO	43

5.2.1	RADIAÇÃO SOLAR E TEMPERATURA AMBIENTE	44
5.2.2	TEMPERATURA ATINGIDA PELOS PAINÉIS	45
5.2.3	CORRENTE.....	47
5.2.4	POTÊNCIA E EFICIÊNCIA.....	48
6	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
	APÊNDICES.....	53
	APÊNDICES.....	55
	APÊNDICES.....	56

LISTA DE FIGURAS

1.1	Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) (ENERGIA, 2021).....	1
1.2	Oferta Interna de Energia Elétrica - 2020 (%) (ENERGIA, 2021)	2
1.3	Renewable Energy Statistics 2021 (IRENA, 2021)	2
1.4	Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil (ABSOLAR, 2021).....	3
1.5	Geração de energia solar. (SOLAR, 2021)	4
2.1	Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V para irradiância de $1000W/m^2$ (PINHO; GALDINO, 2014)	6
2.2	Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $500W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)	7
2.3	Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $600W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)	8
2.4	Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $700W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)	8
2.5	Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $800W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)	9
2.6	Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $900W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)	9
2.7	Eficiência do sistema x temperatura do painel, para radiância de $1000W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)	10
2.8	Análise computacional de eficiência de painéis fotovoltaicos com a temperatura (RIBEIRO; MATOS; ALEXANDRIA, 2016).....	11
2.9	Comparativo entre os sistemas móvel e fixo (LIMA, 2020)	12
2.10	– Diferenças de produção mensal de energia elétrica e ganhos de produção do seguidor solar (NÓBREGA et al., 2019)	12
2.11	Análise descritiva da produção de energia pelos sistemas fotovoltaicos simulados (NÓBREGA et al., 2019)	13
2.12	Potência e radiação solar no primeiro experimento, para os painéis fixo (a) e móvel (b).(MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021)	14
2.13	Potência e radiação solar no segundo experimento, para os painéis fixo (a) e móvel (b).(MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021)	15
2.14	Potência e radiação solar no terceiro experimento, para os painéis fixo (a) e móvel (b).(MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021)	16
2.15	Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e o painel em ângulo fixo no dia 24/10/2017 no período matutino, entre 08:40 e 13:07h. (FREITAS, 2018).....	17

2.16	Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e o painel em ângulo fixo no dia 24/10/2017 no período vespertino, entre 12:00 e 17:17h.(FREITAS, 2018).....	17
3.1	Primeira Lei de Kepler (UNICAMP, 2020).....	19
3.2	Segunda Lei de Kleper (UNICAMP, 2020).....	20
3.3	Ângulos notáveis em Solarimetria (PEREIRA et al., 2017)	22
3.4	Componentes da Irradiância Solar(PEREIRA et al., 2017)	24
3.5	Radiação Solar nas diferentes regiões brasileiras (PEREIRA et al., 2017).....	24
3.6	Índices percentuais de energia recebida e assimilada pela célula fotovoltaica (GHENSEV, 2006).....	25
3.7	Bandas de Valência e Bandas de Condução. (SOLARTHON, 2022).....	27
3.8	Modelo funcional de uma célula fotovoltaica.(GHENSEV, 2006).....	28
3.9	(a) Constituição interna de uma célula fotovoltaica típica; (b) Detalhes da constituição da grelha metálica. (STONE, 2007).....	29
3.10	Curvas de corrente (azul) e potência (vermelha) em função da tensão de saída de um painel fotovoltaico. (JÚNIOR, 2015).....	31
3.11	Conversor Boost. (PERUZZO; JUNIOR, 2021).....	31
3.12	Esquemático elétrico do sistema de medição da potência do painel solar. (Fonte: André Mariano).....	32
3.13	Rastreador solar de eixo simples horizontal. (ORTIZ et al., 2018).....	33
3.14	Rastreador solar de eixo duplo. (ORTIZ et al., 2018)	34
3.15	Curvas IxV e PxV para temperatura constante (25 [°C]) para três valores de intensidade de radiação solar diferentes. (MORALES, 2010)	34
3.16	Curvas IxV e PxV para radiação solar constante de 1 [kW/m ²] para três valores de temperatura. (MORALES, 2010).....	35
4.1	Projeto do rastreador. Note que na figura não foram desenhados os contrapesos.....	36
4.2	Eixo que transmite torque do motor para a engrenagem de 18 dentes.....	37
4.3	Conjunto rolamento axial, engrenagem maior e chapa metálica	37
4.4	Haste de sustentação do painel fixada à chapa metálica e ao conjunto rolamento axial e engrenagem maior.....	38
4.5	Mecanismo de 4 barras.....	38
4.6	Esquemático para o cálculo das distâncias	39
4.7	Caixa localizadora.....	40
4.8	Esquemático elétrico da instrumentação do equipamento de rastreamento. (Fonte: André Mariano).....	41
5.1	Teste do rastreador.	43
5.2	Teste de geração.	44
5.3	Radiação solar incidente nos painéis.	45
5.4	Temperatura ambiente.	45

5.5	Temperatura superior dos painéis.	46
5.6	Temperatura inferior dos painéis.	46
5.7	Corrente gerada pelos painéis.	47
5.8	Corrente gerada pelos painéis.	48
1	Emissões durante a produção de módulos fotovoltaicos de silício policristalino. (SOARES, 2017)	81
2	Elementos metálicos e semimetálicos que podem ser recuperados de módulos fotovoltaicos. (PRADO, 2018).....	82
3	Tecnologias de reciclagem para módulos c-Si. (SCOLLA, 2020).....	83

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da economia mundial tem feito com que a demanda por energia elétrica aumente de forma significativa. Em setores como indústria, agricultura e transporte, a eletricidade é um fator fundamental para o funcionamento e produção. Com isso, é cada vez mais necessário a busca por fontes alternativas de energia. Na Primeira Revolução Industrial, houve a consolidação do carvão mineral como a principal fonte de energia, já na Segunda Revolução Industrial, o petróleo teve grande ascensão. Nos dias atuais, essas fontes ainda são empregadas em larga escala, o carvão corresponde a 4,9 % e o petróleo a 33,1 % (EPE, 2021). Entretanto, como são fontes poluidoras e limitadas, há a necessidade de encontrar fontes alternativas que sejam capazes de suprir a demanda energética.

A matriz energética brasileira tem sido bastante modificada ao longo dos anos, por isso, fontes de energia que antes representavam uma pequena porcentagem na produção de energia, agora vem ganhando um maior espaço, como é o caso das fontes renováveis, uma vez que são alternativas limpas (não produzem gases de efeito estufa) e inesgotáveis (são constantemente reabastecidas) (AMBSCIENCE, 2022).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) elabora todo ano o Balanço Energético Nacional a fim de contabilizar a oferta e a demanda de energia elétrica no Brasil, bem como os recursos energéticos e as suas contribuições na matriz energética total, além de atividades de extração de recursos energéticos primários, sua conversão em formas secundárias, importação e exportação, distribuição e uso final de energia.

Em 2020, a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) ficou em 645,9 TWh. A geração solar apresentou a maior taxa de crescimento em 2020, com 61,5%, sendo que a geração distribuída já contribuiu com 45% da geração total. Os dados podem ser verificados na Figura 1.1 e na Figura 1.2

ESPECIFICAÇÃO	GWh		20/19 %	Estrutura (%)	
	2019	2020		2019	2020
HIDRÁULICA	397.877	396.327	-0,4	61,1	61,4
BAGAÇO DE CANA	36.827	38.776	5,3	5,7	6,0
EÓLICA	55.986	57.051	1,9	8,6	8,8
SOLAR	6.655	10.750	61,5	1,0	1,7
OUTRAS RENOVÁVEIS (a)	18.094	19.966	10,3	2,8	3,1
ÓLEO	6.926	7.745	11,8	1,1	1,2
GÁS NATURAL	60.448	53.464	-11,6	9,3	8,3
CARVÃO	15.327	11.946	-22,1	2,4	1,8
NUCLEAR	16.129	14.053	-12,9	2,5	2,2
OUTRAS NÃO RENOVÁVEIS (b)	12.060	11.121	-7,8	1,9	1,7
IMPORTAÇÃO	24.957	24.718	-1,0	3,8	3,8
TOTAL (c)	651.285	645.915	-0,8	100,0	100,0
<i>Dos quais renováveis</i>	<i>540.395</i>	<i>547.587</i>	<i>1,3</i>	<i>83,0</i>	<i>84,8</i>

Figura 1.1: Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) (ENERGIA, 2021)

Em 2020, as fontes renováveis ficaram com 84,8% de participação na matriz da OIEE e as não-renováveis com 15,2%.

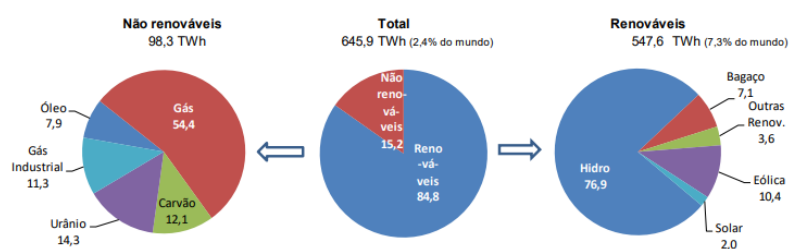


Figura 1.2: Oferta Interna de Energia Elétrica - 2020 (%) (ENERGIA, 2021)

O marco da geração de energia solar distribuída no Brasil ocorreu em 2012, quando a regulamentação da tecnologia foi feita através da Resolução Normativa 482, que estabeleceu regras para a geração distribuída. Em 2015, a Resolução Normativa 687 criou três modalidades de geração distribuída: a geração compartilhada, as múltiplas unidades consumidoras e o autoconsumo remoto. Com a criação dessas modalidades, foi possível observar um crescimento do público da geração distribuída, o que ajudou a acelerar o crescimento do mercado de energia solar no Brasil. (SOLAR, 2021)

Em 2019, o mercado de energia solar no Brasil cresceu mais de 212 %, alcançando 2,4 GW instalados. Em outubro de 2020, o país chegou a marca de 7 GW de potência instalada de energia elétrica proveniente do Sol. Hoje, o Brasil ocupa a décima quarta posição no ranking mundial de capacidade instalada, conforme está ilustrado na . Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia, a expectativa é que até o final de 2030, a mini-geração e micro-geração distribuída totalizem 25 GW de potência instalada no Brasil, o que irá compor cerca de 4,6 % da matriz elétrica do país. (SOLAR, 2021)

Ranking	País	Capacidade Instalada [MW] (acumulada em 2020)
1	China	253.884
2	EUA	73.814
3	Japão	68.665
4	Alemanha	53.781
5	Índia	38.983
6	Itália	21.594
7	Austrália	17.342
8	Vietnã	16.504
9	Coreia do Sul	14.575
10	Reino Unido	13.462
11	Espanha	11.785
12	França	11.724
13	Países Baixos	10.213
14	Brasil	10.000*

Figura 1.3: Renewable Energy Statistics 2021 (IRENA, 2021)

O crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil está representado na Figura 1.4

Fotovoltaica no Brasil

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2020.

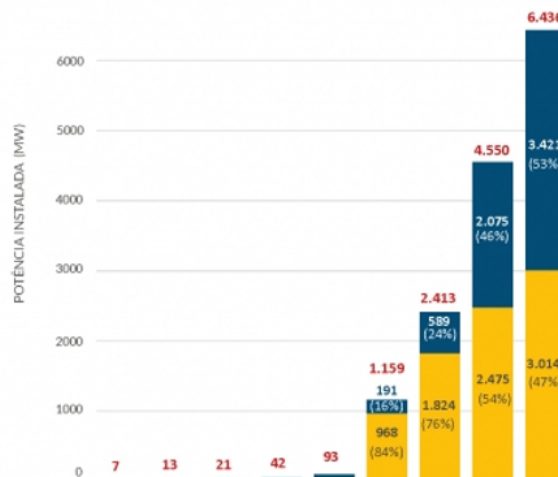


Figura 1.4: Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil (ABSOLAR, 2021)

A geração de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos é baseada na utilização de painéis fotovoltaicos que são capazes de transformar a energia dos raios do Sol em corrente elétrica (corrente contínua). A potência gerada é enviada para o inversor que é o equipamento responsável pela conversão da energia para os padrões da rede da concessionária (corrente alternada). Posteriormente, a energia é injetada na rede elétrica e já poderá ser utilizada pelo consumidor. Nos sistemas solares conectados à rede da concessionária, chamados de *on-grid*, toda a energia excedente, que não for utilizada imediatamente pelos equipamentos do consumidor, será transferida para a rede da concessionária. Já os sistemas *off-grid* são aqueles em que o sistema não é conectado à rede elétrica, projetados para o auto-sustento da região abastecida. E os sistemas híbridos são sistemas fotovoltaicos que possibilitam duas formas de operação, armazenam a energia solar excedente em baterias para ser utilizada quando não houver produção. (SOLAR, 2021)

A Figura 1.5 esquematiza o processo de geração.

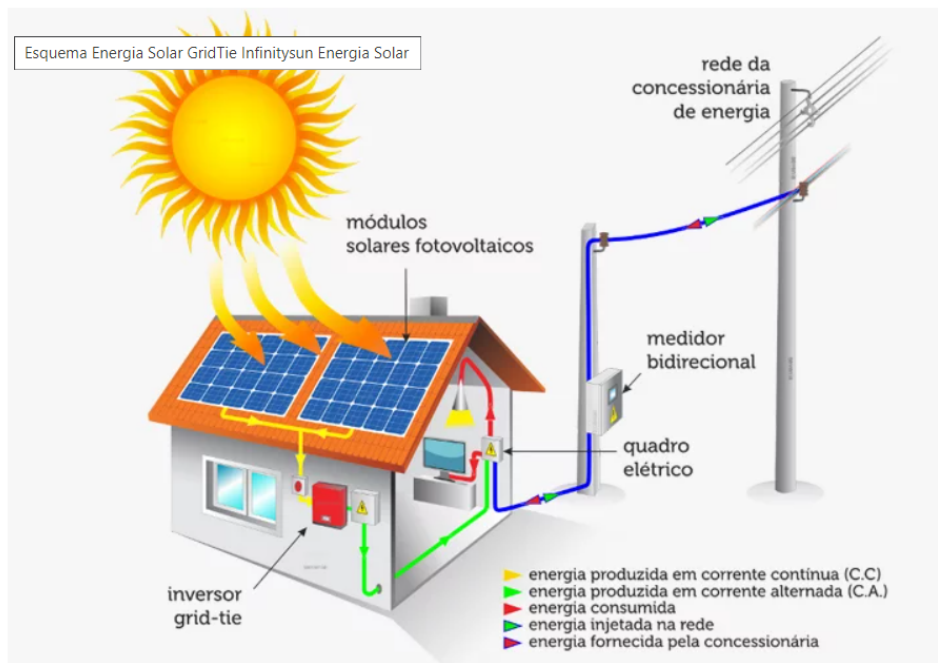


Figura 1.5: Geração de energia solar. (SOLAR, 2021)

A grande barreira no desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos é a eficiência dos módulos, que é o percentual de energia solar transformada em energia elétrica, que ainda é muito baixa. Painéis comercializados atualmente, como os de silício policristalinos, têm sua eficiência entre 15% e 19%, sendo os painéis com mais de 17% considerados de alto rendimento (SOLAR, 2021). Enquanto os de silício monocristalinos têm uma eficiência entre 15% a 22%.

Uma forma de aumentar a geração de um painel solar é montá-lo em um sistema de seguimento solar, esse tipo de sistema garante que o painel esteja sempre posicionado perpendicularmente ao Sol, aumentando a exposição direta dos raios solares. O ganho de geração de energia pode alcançar valores de 25 a 45%, quando passados por testes (SOLAR, 2021). Em regiões que possuem estações do ano bem definidas, no verão, a produção de energia pode aumentar 50%. Já no inverno, o aumento pode chegar a 20%, o que é considerado alto, já que no inverno os dias são mais curtos, e a geração dos sistemas fotovoltaicos já é mais reduzida.

No painel fixo, a placa fotovoltaica tem seu ângulo de inclinação definido de acordo com a latitude do local em que é instalada, no caso de Brasília, como a latitude é de aproximadamente 16°, o painel também é instalado com essa angulação e fica orientado para o Norte. No rastreador, o ângulo da placa fotovoltaica é ajustado de acordo com a posição do Sol para conseguir um melhor aproveitamento da radiação solar direta que chega ao painel (SOLAR, 2020). Os movimentos são feitos a partir do ângulo azimutal (que permite a rotação do painel em torno de seu próprio eixo) e do zênite (que regula a elevação do painel). Entretanto, apesar do rastreador parecer uma opção mais viável quando comparado à placa fixa, alguns fatores devem ser levados em consideração: à medida que a placa fica mais exposta ao sol, há a elevação da temperatura, o que causa um ligeiro

aumento da corrente e uma grande diminuição da tensão, o que faz com que a potência gerada diminua. Outro fator que também precisa ser levado em consideração é que os painéis fotovoltaicos com rastreamento têm o seu melhor aproveitamento em dias predominantemente claros, devido ao caráter direcional da radiação direta.

A menor radiação incidente no painel fixo poderia ser compensada com um aumento da quantidade de painéis, porém, essa medida demandaria uma área de instalação maior, o que poderia acarretar em um aumento do capital investido. A escolha de um inversor com maior potência também poderia ser uma opção viável para o aumento da energia gerada, entretanto o custo também seria maior. Por isso, para que seja escolhida uma tecnologia em detrimento de outra, é necessário que seja feita uma comparação das duas, submetidas aos mesmos fatores climáticos, posição geográfica e etc. Assim, o presente trabalho de conclusão de curso tratará de construir e operar as duas tecnologias para fins comparativos.

Um fato importante e que vem ganhando cada vez mais espaço é sobre a sustentabilidade das tecnologias de conversão solar. É sabido que a vida útil dos painéis fotovoltaicos está em torno de 25/30 anos, e como essa tecnologia é relativamente nova, em breve haverão milhares de painéis sendo descartados e é importante que isso seja feita de maneira correta. Nos anexos foram discutidas algumas formas de reciclagem de células fotovoltaicas, bem como suas vantagens e desvantagens.

1.1 OBJETIVOS

Comparar a geração fotovoltaica entre dois painéis, sendo o primeiro um painel fixo e o segundo um painel com rastreador solar.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos

- Construir um rastreador solar;
- Elaborar um sistema de medição da geração de energia do painel solar;
- Testar a geração dos dois painéis, quando submetidos as mesmas condições meteorológicas: como vento, temperatura, etc.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RELAÇÃO DA TEMPERATURA COM A EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS

Determinar o desempenho de um sistema fotovoltaico não depende somente de suas características básicas, mas do ambiente em que eles são colocados e das condições a que são submetidos. (BOMUBO-PEPPLE; C; I, 2009)

A temperatura de operação desempenha um papel central no processo de conversão fotovoltaica. Tanto a eficiência elétrica como a potência de saída de um módulo fotovoltaico dependem linearmente da temperatura de funcionamento, as várias correlações propostas na literatura representam simplificadas equações que podem ser aplicadas aos módulos fotovoltaicos ou geradores fotovoltaicos. (KAWAMURA et al., 1997)

O desempenho geral de células fotovoltaicas varia com a variação de temperatura e a irradiância. Com a mudança no tempo durante o dia, a energia recebida do Sol pelo painel fotovoltaico sofre alterações, tanto a irradiância como a temperatura afetam a eficiência da célula solar. (CHEGAAR et al., 2013)

Uma célula fotovoltaica é dimensionada para trabalhar a uma temperatura média de 25°C e valores discrepantes desse valor irão impactar em sua eficiência. No Manual de Engenharia Fotovoltaica, é discutido sobre como as variações da radiação solar incidente e da temperatura ambiente afetam a temperatura de operação das células fotovoltaicas que compõem os módulos fotovoltaicos. A Figura 2.1 mostra as curvas I-V para diversas temperaturas da célula fotovoltaica, com irradiância de 1000 W/m^2 . O aumento da irradiância incidente e/ou da temperatura ambiente produz um aumento da temperatura da célula e, conseqüentemente, tende a reduzir sua eficiência. Isto se deve ao fato de que a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre uma elevação muito pequena, quase que desprezível. (PINHO; GALDINO, 2014)

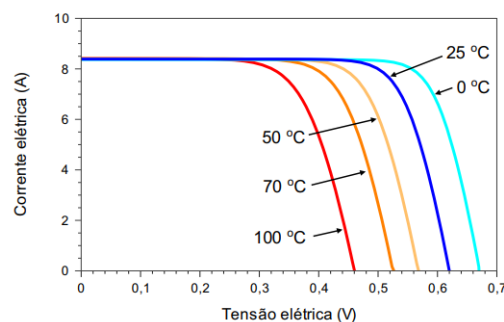


Figura 2.1: Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V para irradiância de 1000 W/m^2 (PINHO; GALDINO, 2014)

Os sistemas fotovoltaicos apresentam um rendimento mais elevado quando a incidência dos raios solares é perpendicular à superfície do painel, o que significa que um sistema de posicionamento automático dos módulos fotovoltaicos pode aumentar a produção de energia em até 40%, conforme relatado no estudo do autor. (RHIF, 2011)

Um estudo realizado em 2017 teve como objetivo a determinação da eficiência de um sistema fotovoltaico efetuando medidas de grandezas elétricas e meteorológicas e a partir dessas medidas calcular o valor da potência máxima gerada. Foi analisado que os valores das tensões de circuito aberto medidos são crescentes até o ponto em que a temperatura da célula atinge o valor de 34°C e a irradiância no plano dos módulos o valor de $636\text{W}/\text{m}^2$. A partir desse ponto, o valor da tensão de circuito aberto passa a ser decrescente devido ao aumento da temperatura da célula em consequência do aumento da irradiância. Este estudo também relaciona as eficiências calculadas do sistema fotovoltaico com a temperatura na célula e também com a irradiância nos módulos, considerando o período de insolação. O aumento da temperatura das células devido ao aumento da irradiância diminuiu a eficiência do módulo devido às características intrínsecas das células. A tensão diminui com o aumento da temperatura.(SOUZA; ARISTONE, 2017)

A influência da temperatura na eficiência dos painéis fotovoltaicos também foi analisada em outro estudo, que comparou a influência da temperatura sobre a eficiência dos painéis com diferentes níveis de incidência de irradiação solar ($500, 600, 700, 800, 900$ e $1000\text{W}/\text{m}^2$). (MICHELS et al., 2010)

Os resultados encontrados estão representados nas Figuras de 2.2 a 2.7:

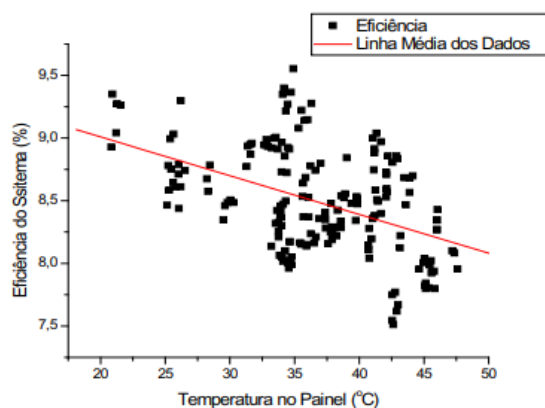


Figura 2.2: Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $500\text{W}/\text{m}^2$ (MICHELS et al., 2010)

Para a irradiância de $500\text{W}/\text{m}^2$, a eficiência máxima encontrada foi de 9,55%, a mínima de 7,51% e a média atingiu o valor de 8,48%. Já a temperatura oscilou de um máximo de $47,58^{\circ}\text{C}$ até um mínimo de $20,82^{\circ}\text{C}$, sendo que a média ficou em $36,85^{\circ}\text{C}$. (MICHELS et al., 2010)

Para a irradiância de $600\text{W}/\text{m}^2$, a eficiência máxima encontrada foi de 9,41%, a mínima de 7,89% e a média atingiu o valor de 8,74%. Já a temperatura oscilou de um máximo de $49,43^{\circ}\text{C}$

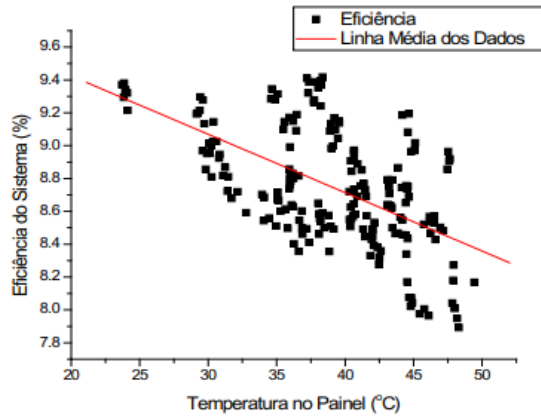


Figura 2.3: Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $600W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)

até um mínimo de $23,70^{\circ}C$, sendo que a média ficou em $39,00^{\circ}C$. (MICHELS et al., 2010)

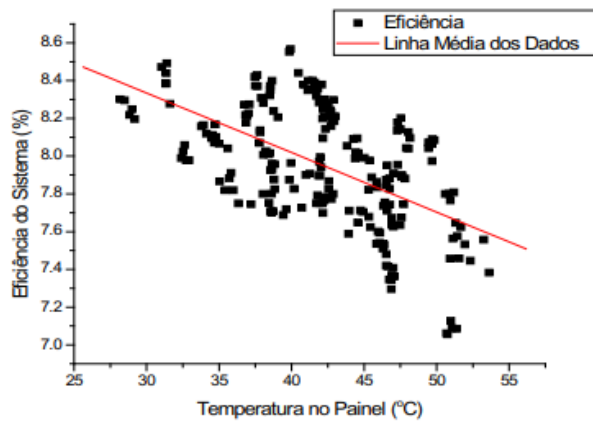


Figura 2.4: Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $700W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)

Para a irradiância de $700W/m^2$, a eficiência máxima encontrada foi de $8,56\%$, a mínima de $7,05\%$ e a média atingiu o valor de $7,94\%$. Já a temperatura oscilou de um máximo de $53,62^{\circ}C$ até um mínimo de $28,18^{\circ}C$, sendo que a média ficou em $42,28^{\circ}C$. (MICHELS et al., 2010)

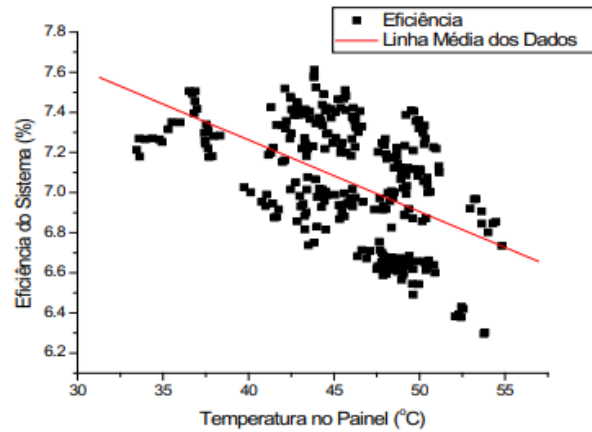


Figura 2.5: Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $800W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)

Para a irradiância de $800W/m^2$, a eficiência máxima encontrada foi de 7,61%, a mínima de 6,29% e a média atingiu o valor de 7,05%. Já a temperatura oscilou de um máximo de $54,80^{\circ}C$ até um mínimo de $33,45^{\circ}C$, sendo que a média ficou em $45,85^{\circ}C$. (MICHELS et al., 2010)

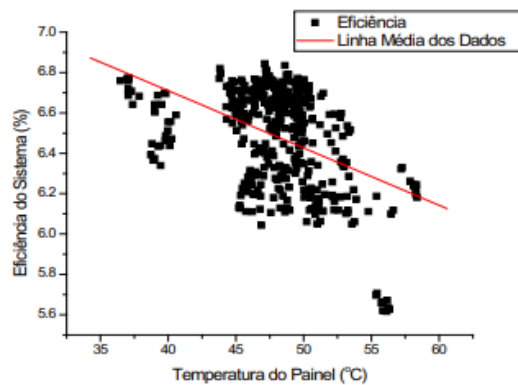


Figura 2.6: Eficiência do sistema x temperatura do painel, para irradiância de $900W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)

Para a irradiância de $900W/m^2$, a eficiência máxima encontrada foi de 6,84%, a mínima de 5,61% e a média atingiu o valor de 6,47%. Já a temperatura oscilou de um máximo de $58,37^{\circ}C$ até um mínimo de $36,42^{\circ}C$, sendo que a média ficou em $48,27^{\circ}C$. (MICHELS et al., 2010)

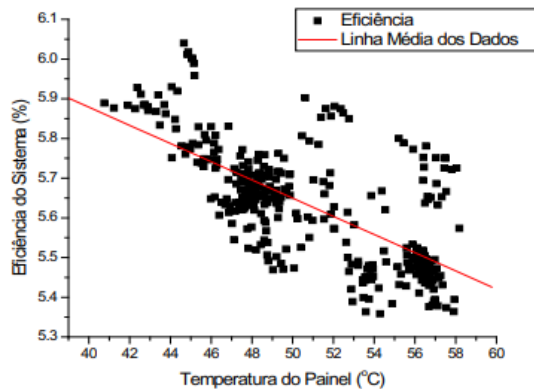


Figura 2.7: Eficiência do sistema x temperatura do painel, para radiância de $1000W/m^2$ (MICHELS et al., 2010)

Para a irradiância de $1000W/m^2$, a eficiência máxima encontrada foi de 6,03%, a mínima de 5,35% e a média atingiu o valor de 5,63%. Já a temperatura oscilou de um máximo de 58,18°C até um mínimo de 40,76°C, sendo que a média ficou em 50,68°C. (MICHELS et al., 2010)

Assim, a partir dos resultados observados, ficou concluído que o aumento da temperatura provoca uma diminuição do valor da tensão e, conseqüentemente, haverá a diminuição da potência e da eficiência. A eficiência pode variar em um sistema fotovoltaico de uma estação para outra (verão – inverno) ou até mesmo em um dia, onde as manhãs possuem uma temperatura mais amena se comparado ao período da tarde. Para aumentar a eficiência dos painéis fotovoltaicos é necessária uma melhor dissipação do calor do painel ou até mesmo a sua refrigeração. (MICHELS et al., 2010)

Também foi analisado uma simulação computacional sobre da influência da temperatura na potência de um painel fotovoltaico. Nesse estudo, as simulações foram criadas no software ICEM, usando dimensões reais de um painel solar, que foram então processadas no software ANSYS-CFX. Os resultados obtidos vão de encontro aos encontrados em testes práticos com os painéis. Comparando-se os percentuais de perda de potência em painéis operando em condições de campo presentes na literatura com os calculados a partir dos resultados das simulações, observou-se que estes foram bastantes expressivos, ressaltando a necessidade de um sistema de resfriamento para se garantir um bom funcionamento dos painéis. As simulações foram feitas levando ou não em consideração a presença do vento, para o resfriamento dos painéis. Os resultados estão expressos na Figura 2.8, em que foram analisados a velocidade do vento, temperatura máxima que o painel atinge e a perda de eficiência. (RIBEIRO; MATOS; ALEXANDRIA, 2016)

Simulação	Velocidade(m/s)	Temperatura máxima (°C)	% queda
1	0,00	72,00	19,74
2	2,50	45,00	8,40
3	5,00	40,00	6,30
4	7,50	36,90	4,99
% de variação na temperatura			48,75

Figura 2.8: Análise computacional de eficiência de painéis fotovoltaicos com a temperatura (RIBEIRO; MATOS; ALEXANDRIA, 2016)

2.2 COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM PAINEL FIXO E COM RASTREADOR

Com a crescente expansão do sistema fotovoltaico em todo o mundo, estão surgindo vários estudos para a maximização da sua conversão, em prol de tornar essa fonte de energia mais eficiente. Assim, uma tecnologia que vem ganhando cada vez mais visibilidade é a do rastreador solar. Muitas pesquisas estão sendo feitas com rastreadores solares com o objetivo de utilizar essa tecnologia para aumentar a geração de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos.

Existem casos em que um sistema de seguimento solar, apesar de incrementar em cerca de 20% o preço total de um sistema de geração fotovoltaica de energia, pode vir a aumentar em torno de 40% as receitas geradas. Os seguidores fotovoltaicos também apresentam geralmente um baixo custo de manutenção. (SHAYANI, 2006)

Considerando as atenuações da atmosfera, o uso de rastreador de Sol leste-oeste apresenta a vantagem teórica de aumentar em até 48% a capacidade de aproveitamento dos raios solares para conversão em energia em dias sem nuvens. A tecnologia fotovoltaica se destaca pelo fato de possuir grande robustez associada aos painéis fotovoltaicos e sua reduzida manutenção. (SHAYANI, 2006)

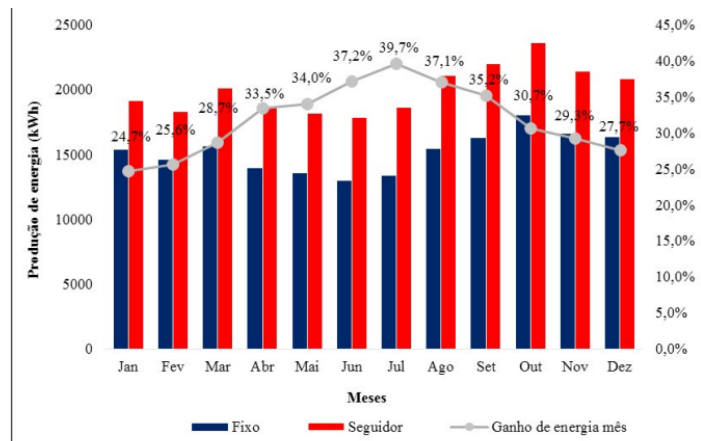
Um estudo realizado em Mossoró-RN, fez uma análise comparativa entre um sistema solar com rastreo e um painel fotovoltaico fixo e observou a influência de um seguidor solar quanto a geração de energia de um sistema fotovoltaico. O rastreador utilizado foi o de um eixo, com movimentação leste-oeste e foram captados dados em 3 dias, com diferentes condições meteorológicas. (LIMA, 2020)

A partir do levantamento e armazenamento dos dados de tensão e corrente de ambos os sistemas foi possível estimar a potência e energia gerada por eles. Na Figura 2.9 é apresentado o desempenho dos dois sistemas, assim como o ganho do sistema móvel quando comparado ao sistema fixo. Além do desempenho e do ganho foram verificadas as condições climáticas em cada dia do experimento. Foi possível observar que nos três dias de ensaio, o sistema móvel gerou mais energia do que o sistema fixo, onde o ganho máximo ficou em torno de 23%. Já o ganho médio foi de aproximadamente 16%. No dia nublado o desempenho do sistema fixo perante o sistema móvel foi maior do que nos outros dois dias. (LIMA, 2020)

Dia	Energia Sist. Móvel (Wh)	Energia Sist. Estát. (Wh)	Ganho (%)	Condições meteorológicas
1	214,25	184,33	16,23	Nuvens esparsas
2	195,29	176,71	10,51	Nuvens esparsas
3	163,83	132,74	23,42	Parcialmente Nublado
Média	191,12	164,59	16,12	-

Figura 2.9: Comparativo entre os sistemas móvel e fixo (LIMA, 2020)

Outro estudo analisado fez uma comparação entre sistemas fotovoltaicos em modo fixo e com seguidor em uma instituição pública de ensino no Nordeste do Brasil, por meio de uma simulação no software System Advisor Model. Além da análise da eficiência, também foi analisada a viabilidade financeira de cada tecnologia, para assim escolher a que melhor se adequaria ao consumo de energia elétrica do IFPB (Instituto Federal da Paraíba). O sistema foi dimensionado com painéis fixos para serem instalados nos telhados de três edificações do IFPB. O software SAM dispõe de diversos modelos para estimar a produção de energia de um sistema fotovoltaico conectado à rede, seja residencial ou comercial, fixo ou com seguidor. As estimativas de produção de energia são baseadas nas variáveis de entrada do modelo, que devem ser definidas pelo usuário ou admitidas a partir de propostas já existentes no software. O rastreador solar utilizado foi o de eixo único e horizontal. (NÓBREGA et al., 2019) Os resultados da simulação estão representados nas Figura 2.10 e Figura 2.11



Fonte: Dados obtidos a partir de simulação SAM

Figura 2.10: – Diferenças de produção mensal de energia elétrica e ganhos de produção do seguidor solar (NÓBREGA et al., 2019)

Métricas	Produção do sistema fixo (kWh)	Produção do sistema com seguidor (kWh)	Ganhos (%)
Máxima	18.074,80	23.630,30	31
Mínima	13.020,70	17.870,90	37
Média	15.195,40	20.022,12	32
Mediana	15.411,65	20.175,05	31
Desvio padrão	1.526,18	1.861,66	-
Coeficiente de variação	0,10	0,09	-
Curtose	-0,59	-0,56	-
Assimetria	0,22	0,62	-
Produção anual	182.344,90	240.265,50	32

Figura 2.11: Análise descritiva da produção de energia pelos sistemas fotovoltaicos simulados (NÓBREGA et al., 2019)

A produção mínima do sistema com seguidor é bem próxima à máxima do sistema fixo. Isso comprova a maior eficiência do sistema que acompanha o caminho do Sol no sentido leste-oeste. Os dois sistemas possuem baixos coeficientes de variação, indicando que a média mensal tem boa representatividade e pouca variação anual, o que pode ser explicado pelo fato de regiões próximas à linha do Equador apresentarem menor variação na radiação ao longo do ano. (NÓBREGA et al., 2019)

O sistema com seguidor solar apresenta ganhos adicionais de energia produzida em relação ao sistema fixo, mês a mês. Verifica-se que o período de menor produção para ambos os sistemas são os meses de abril a julho. Nos meses de junho e julho ocorrem os ganhos mais consideráveis com a instalação do seguidor solar: 37,2% e 39,7%, respectivamente. Durante esses meses, que integram a estação de inverno no hemisfério sul, há uma redução na disponibilidade de recurso solar explicada pelos movimentos da Terra, pois os dias são mais curtos e há menos radiação solar nessa época do ano (TOLMASQUIM, 2016). Isso implica melhor desempenho para sistemas que acompanham o movimento diário do Sol durante o período de baixa disponibilidade de recurso solar. (NÓBREGA et al., 2019)

Entretanto, mesmo o rastreador solar tendo se mostrado mais eficiente na produção de energia, o estudo chegou à conclusão de que o painel fixo seria mais viável economicamente, pois atenderia à demanda energética do IFB com um custo menor. (NÓBREGA et al., 2019)

Também foi analisado um terceiro estudo que teve como base um ensaio laboratorial para a comparação entre a irradiação solar captada por painéis fotovoltaicos fixos e móveis. O propósito do estudo foi verificar, por meio de três tipos de carga, sendo cada uma constituída por um conjunto de lâmpadas variadas, a irradiação sobre os painéis e a potência disponibilizada a partir dessa irradiação, tanto para o sistema fixo como para o sistema móvel. O experimento ocorreu na área externa do Laboratório do Centro de Energias Renováveis da Faculdade de Engenha-

ria da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Guaratinguetá, São Paulo. (MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021)

Os dados foram coletados entre os dias 24 de março e 05 de maio de 2020. Os experimentos foram realizados de formas diferentes acompanhando o movimento do Sol.

- Teste com intervalos de 15 minutos em cada uma das posições pré-definidas a 15°, 60°, 105°, 150° e 330° em relação ao norte e também uma vez um uma posição fixa à 15° ao norte, com cinco lâmpadas de 100W/127 V cada.
- Teste com intervalo de 15 minutos em cada posição acompanhando a melhor posição de captação dos raios solares à 245°, 250°, 255°, 260°, 270°, 280°, 290°, 300°, 310°, 315°, 320°, e 330° relação ao norte e também uma posição fixa à 15° ao norte, com 22 lâmpadas de 200W/220 V cada, e em seguida com 2 duas lâmpadas de 250W/24 V cada.

Comparando-se os sistemas fixo e móvel do primeiro experimento, com o conjunto de 5 lâmpadas (a e b, respectivamente), verificou-se que a incidência solar sobre os painéis do sistema fixo variou entre 800 e 950 W/m². Já o sistema móvel teve maior irradiação nos horários de pico e variou entre 550 e 950 W/m². A potência do sistema manteve-se estável, tanto na estrutura móvel como na estrutura fixa. (MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021) O resultado está representado na Figura 2.12

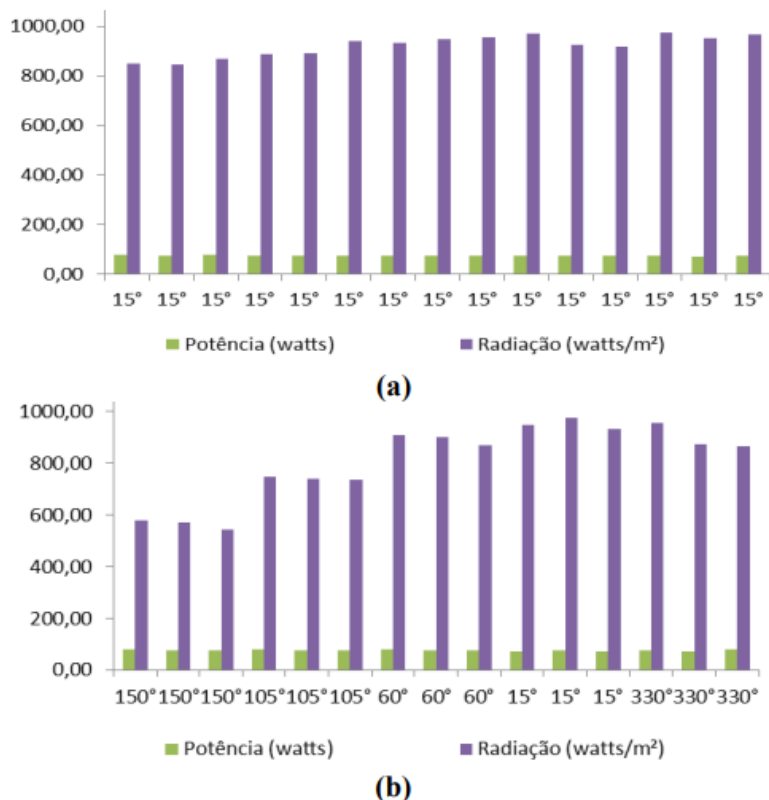


Figura 2.12: Potência e radiação solar no primeiro experimento, para os painéis fixo (a) e móvel (b).(MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021)

Para o conjunto de 22 lâmpadas incandescentes de 200W/220V, foi obtida uma resposta muito próxima entre os dois sistemas, no que se refere à irradiação captada, mas a potência do sistema fixo foi menor principalmente no início e no final do dia, quando há menor irradiação. Concluiu-se então que, com essa potência mais estável, o sistema móvel foi mais eficiente para captação de irradiação e efetivo para disponibilização de potência. (MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021) O resultado está representado na Figura 2.13

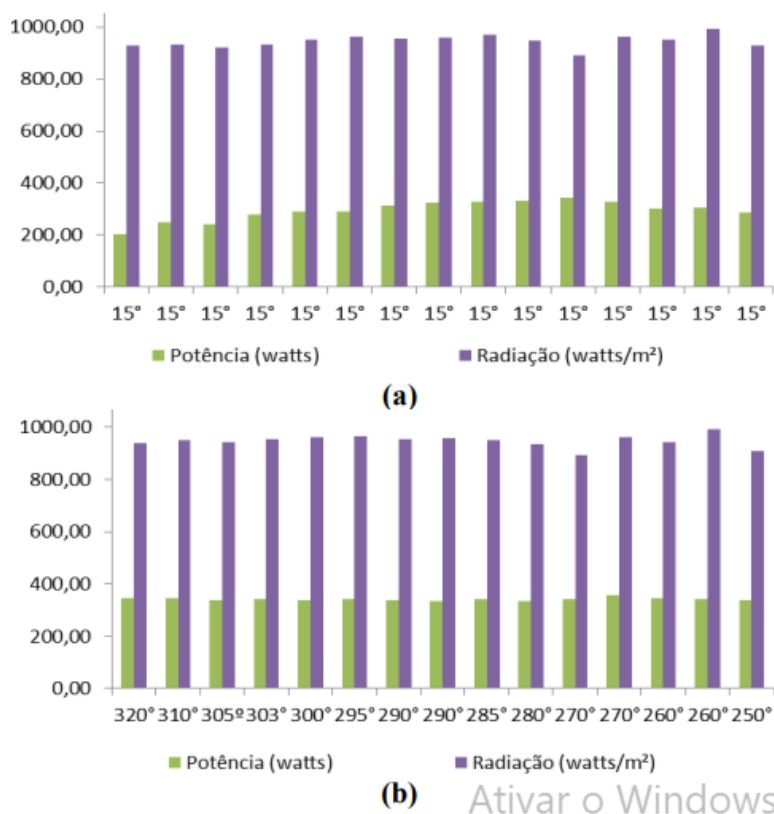


Figura 2.13: Potência e radiação solar no segundo experimento, para os painéis fixo (a) e móvel (b).(MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021)

Os últimos testes foram com a célula de carga de 2 lâmpadas LED de 250W/ 24V, também para os sistemas fixo e móvel. No caso da célula de carga com 2 lâmpadas LED de 250W/24 V, comparou-se o sistema fixo com o sistema móvel e obteve-se um ganho de 10 a 15% de incidência solar sobre os painéis. De forma similar ao experimento anterior, a irradiação do sistema se manteve entre 880 e 1000 W/m², em ambas as estruturas fixa e móvel, mas a potência do sistema na estrutura móvel foi maior, variando de 100W a 190W. Já no experimento com a estrutura fixa a potência variou de 100 W na maior parte do tempo, e com alguns picos de 150W. (MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021) O resultado está representado na Figura 2.14

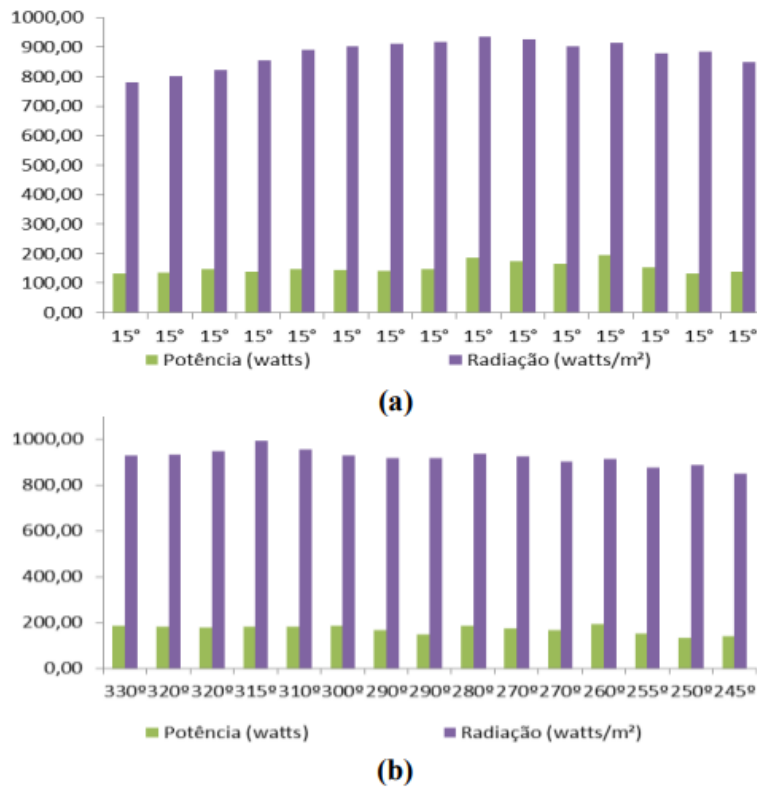


Figura 2.14: Potência e radiação solar no terceiro experimento, para os painéis fixo (a) e móvel (b). (MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021)

Os resultados mostraram que houve um melhor aproveitamento dos painéis fotovoltaicos do sistema móvel, no que se refere à disponibilização de potência. De acordo com os três experimentos realizados, o ganho de potência disponibilizada foi de 10 a 20% em relação à estrutura fixa, que foi verificado pela carga utilizada em cada um dos experimentos. (MACIEL; SOUZA; BOULOMYTIS, 2021)

A última pesquisa apresentada nesta seção analisou a geração de energia de uma placa fotovoltaica fixa com um rastreador solar e verificou que o sistema com rastreador apresentou ganho de produção energética em relação ao painel em ângulo fixo nos horários no início da manhã e final da tarde e períodos ensolarados (FREITAS, 2018), como pode ser visualizado nas Figura 2.15 e Figura 2.16.

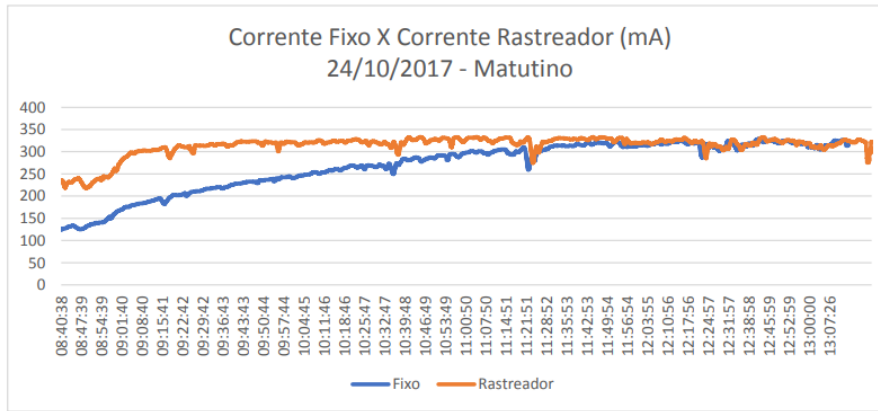


Figura 2.15: Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e o painel em ângulo fixo no dia 24/10/2017 no período matutino, entre 08:40 e 13:07h. (FREITAS, 2018)

Através da Figura 2.15 é possível observar que no horário entre 11:32 e 12:28 a produção energética dos dois painéis foi muito parecida, isso porque nesse horário o Sol está passando pelo zênite, causando a perpendicularidade dos raios solares nos dois painéis. Ou seja, os painéis se encontram em um ângulo ótimo de geração de energia por captação fotovoltaica. (FREITAS, 2018)

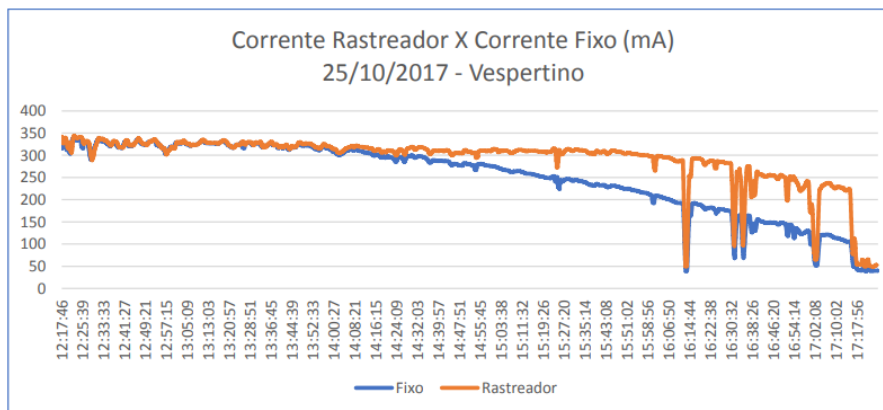


Figura 2.16: Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e o painel em ângulo fixo no dia 24/10/2017 no período vespertino, entre 12:00 e 17:17h.(FREITAS, 2018)

Apesar de não ter sido observado um ganho significativo de produção energética do painel com rastreador em detrimento do fixo no período vespertino, observa-se um comportamento semelhante ao observado no matutino. Quanto mais o Sol se aproxima do horizonte, o painel com sistema rastreador consegue manter a produção energética em um nível mais elevado, graças ao seu posicionalmente perpendicular aos raios solares. (FREITAS, 2018)

Através dos gráficos comparativos da corrente produzida pelas duas configurações do painel, fixo e móvel, observa-se que o painel com rastreador apresenta uma menor variação na produção energética em relação ao painel em ângulo fixo. (FREITAS, 2018)

Como observado nos estudos analisados, os sistemas com rastreamento solar apresentaram ganhos de geração em relação ao painel fixo. No entanto, os ganhos dependem de variáveis climáticas locais, justificando o trabalho de Freitas. (FREITAS, 2018)

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ÓRBITA SOLAR

Uma órbita pode ser descrita como a trajetória de um planeta em resposta ao efeito gravitacional de sua estrela. No sistema solar, todos os planetas, asteroides e cometas estão em órbita ao redor do Sol.

A partir da influência de Copérnico e de Tycho Brahe (astrônomo dinamarquês), o matemático Johannes Kepler propôs um modelo para explicar o movimento dos astros baseado em três leis:

3.1.0.1 PRIMEIRA LEI DE KEPLER

Os planetas descrevem órbitas elípticas em torno do Sol, que ocupa um dos focos da elipse. Conforme ilustrado na Figura 3.1:

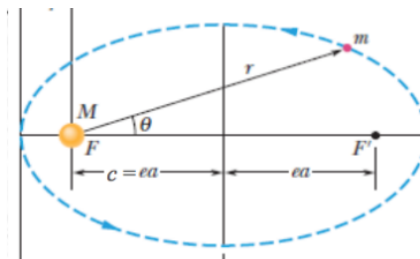


Figura 3.1: Primeira Lei de Kepler (UNICAMP, 2020)

Em que:

a - semieixo maior;

$e = c/a$ – excentricidade da elipse (quando muito pequena, a elipse se parece com uma esfera);

m – representa o planeta ;

F e F' – focos da elipse;

R_p – distância do periélio (ponto mais próximo do Sol);

R_a – distância do afélio (ponto mais afastado do Sol).

3.1.0.2 SEGUNDA LEI DE KEPLER

Em um referencial fixo no Sol, a reta que une o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais, isto é, a taxa de variação da área com o tempo é constante [$\frac{dA}{dt} = \text{cte}$].

Com isso, temos que a velocidade dos planetas em torno do Sol é variada, sendo maior quando

estão no periélio (mais perto do Sol) do que quando estão no afélio (longe do Sol) (UNICAMP, 2020). A ilustração está representada na Figura 3.2:

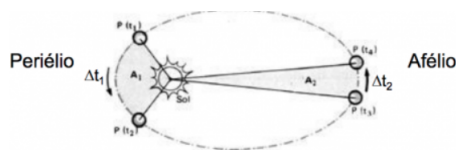


Figura 3.2: Segunda Lei de Kepler (UNICAMP, 2020)

3.1.0.3 TERCEIRA LEI DE KEPLER

Em um referencial fixo no Sol, o quadrado do período de revolução de um planeta ao redor do Sol é proporcional ao cubo do semi-eixo maior da elipse que representa a órbita do planeta.

$$\frac{T^2}{a^3} = k$$

T - período orbital

R - raio médio da órbita

O raio médio da órbita é dado pela média entre os raios máximo e mínimo (periélio e afélio). Quando a Terra aproxima-se do periélio, sua velocidade orbital aumenta, uma vez que a aceleração gravitacional do Sol intensifica-se. Dessa maneira, a Terra tem máxima energia cinética quando nas proximidades do periélio. Aproximando-se do afélio, ela perde energia cinética, tendo assim a sua velocidade orbital reduzida a sua menor medida.

Tendo em vista que o movimento de translação de um planeta é equivalente ao tempo que este demora para percorrer uma volta em torno do Sol, é possível afirmar que quanto mais longe o planeta estiver do Sol, mais longo será seu período de translação.

A Terceira Lei de Kepler foi estudada a fundo por Isaac Newton e complementada na chamada Lei da Gravitação Universal.

Newton identificou que a força de atração gravitacional entre a Terra e o Sol é uma força centrípeta. E, baseado nisso, foi criada a expressão geral da Terceira Lei de Kepler:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

em que:

G – constante da gravitação universal ($6,67 \cdot 10^{-11} N \cdot m^2 / kg^2$)

M – massa do Sol ($1,989 \cdot 10^{30} kg$)

3.2 CARACTERÍSTICAS DO SOL

A partir da teoria heliocêntrica e do papel desempenhado pelo Sol no sistema solar, houve a necessidade de estudar mais a fundo essa estrela e as suas propriedades.

A composição do Sol é de 74% de hidrogênio e 24% de hélio, sendo o percentual restante formado principalmente por oxigênio, carbono e ferro. Toda a energia produzida pelo Sol é proveniente do processo de fusão nuclear decorrente das grandes temperaturas de seu núcleo (cerca de 15 milhões de kelvin) e de sua enorme pressão. (HELERBROCK, 2019)

A estrela é capaz de converter átomos de hidrogênio em hélio. A cada segundo, o Sol funde cerca de 600 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio, convertendo parte dessa massa em energia, na forma de ondas eletromagnéticas, como os raios gama. (HELERBROCK, 2019)

Ao todo, o Sol consome cerca de 4 milhões de toneladas de sua massa por segundo, uma taxa mais do que suficiente para mantê-lo brilhando pelos próximos 6 ou 7 bilhões de anos, devido à sua grande massa, que é de aproximadamente $1,98 \cdot 10^{31}$ kg, mais de 330 mil vezes a massa da Terra. (HELERBROCK, 2019)

Por conta de sua enorme massa, a gravidade na superfície do Sol chega a $274m/s^2$, 27,4 vezes maior que a massa da Terra. Isso faz com que a velocidade de escape por lá chegue aos 617 km/s, mais de 2 milhões de quilômetros por hora. (HELERBROCK, 2019)

O período de rotação do Sol em torno do seu próprio eixo é de 27 dias para o seu equador, que gira a 7189 km/h, e de 35 dias para os seus polos. Essa diferença de período rotacional produz uma rotação diferencial (chamada de dínamo solar), responsável por sua grande atividade magnética, uma vez que toda a matéria presente na estrela encontra-se ionizada (no estado plasmático), dando origem às tempestades solares, erupções coronárias e manchas solares. (HELERBROCK, 2019)

3.3 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é a energia emitida pelo Sol, que se propaga em todas as direções através do espaço por meio de ondas eletromagnéticas. Emitida pela superfície solar, essa energia determina a dinâmica dos processos atmosféricos e climatológicos. Além disso, é direta ou indiretamente responsável por determinadas circunstâncias cotidianas, como a fotossíntese das plantas, a manutenção de uma temperatura compatível com a vida e a formação do vento, algo essencial para a geração de energia eólica (IBERDROLA, 2022).

Nas últimas décadas houveram avanços no aproveitamento térmico para atendimento de demandas residenciais ou processos industriais, quanto para conversão em eletricidade. O aproveitamento fotovoltaico, conhecido como geração fotovoltaica de eletricidade, também apresentou um intenso desenvolvimento que está resultando em um crescimento significativo da participação da energia solar na matriz energética mundial (PEREIRA et al., 2017).

A disponibilidade do recurso energético solar e sua variabilidade espacial e temporal estão intrinsecamente relacionadas a conceitos astronômicos. O primeiro dos fatores a serem considerados é a posição relativa entre o Sol e a Terra. A Terra orbita o Sol a uma distância média de cerca de 150 milhões de quilômetros, completando um ciclo a cada 365,25 dias solares. Ao longo desse período, a distância varia entre $1,47 \cdot 10^8 \text{ km}$ e $1,52 \cdot 10^8 \text{ km}$ e, como resultado, o fluxo de radiação solar (irradiância solar) oscila entre $1,32 \text{ W/m}^2$ e $1,412 \text{ W/m}^2$. O valor médio da irradiância solar igual a $1,366 \text{ W/m}^2$ é definido como a constante solar. (PEREIRA et al., 2017)

Para descrever os ciclos da variabilidade da radiação solar que chega no topo da nossa atmosfera, faz-se uso de conceitos importantes definidos geometricamente como os ângulos apresentados Figura 3.3

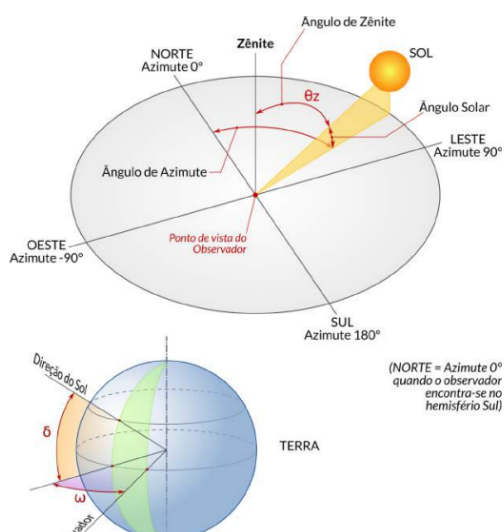


Figura 3.3: Ângulos notáveis em Solarimetria (PEREIRA et al., 2017)

A declinação solar (δ) é o ângulo formado pela inclinação do plano equatorial da Terra e a linha de direção Sol-Terra. Apresenta variação entre $-23^{\circ}27'$ e $+23^{\circ}27'$ ao longo do período de um ano. Por convenção, as declinações são consideradas negativas quando a linha de direção Sol-Terra cruza a superfície no hemisfério Sul. (PEREIRA et al., 2017)

O ângulo horário solar (ω) corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido à rotação da Terra e varia entre -180° e $+180^{\circ}$. Cada hora corresponde a 15° de variação do ângulo horário solar. Por convenção, durante a manhã é positivo, a tarde é negativo e, ao meio dia assume o valor zero. (PEREIRA et al., 2017)

O ângulo zenital solar (θz) representa o ângulo formado entre a vertical no ponto de observação e a direção da linha que liga o mesmo ponto da superfície da Terra ao Sol. Pode ser calculado conhecendo-se os valores da latitude do local (φ), a declinação solar (δ) e o ângulo horário solar (ω). Se o Sol fosse um ponto e a Terra não tivesse atmosfera, o ângulo zenital que mostra o pôr do Sol completo seria de 90 graus. Entretanto, como o Sol não é um ponto e ele possui seu diâmetro angular e sua luz refletida por partículas sólidas na atmosfera, então, até a borda superior do Sol desaparecer no horizonte, seu centro deveria estar um pouco abaixo do horizonte. São 90 graus e

50 minutos em condições atmosféricas normais. É um ângulo do pôr do Sol "oficial".(PEREIRA et al., 2017)

O ângulo azimutal do Sol é o ângulo formado entre a linha de projeção da direção do Sol no plano horizontal com o meridiano do observador. Seu valor pode variar entre -180° e $+180^\circ$, sendo positivo no sentido horário a partir da direção Norte Geográfico no meridiano local.(PEREIRA et al., 2017)

As nuvens têm interferência direta na quantidade de radiação solar que incide na superfície da Terra. Isso se dá em razão de suas propriedades óticas que produzem um espalhamento da radiação.

A irradiância solar (W/m^2) que incide em uma superfície é composta pelas componentes direta e difusa. A irradiância solar direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o Sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera. (PEREIRA et al., 2017)

Os principais tipos de irradiância, são:

- Irradiância extraterrestre (G_o): é a taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera.
- Irradiância direta normal (G_n): é a taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície.
- Irradiância difusa horizontal (G_{dif}): é a taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.).
- Irradiância direta horizontal (G_{dir}): é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre a irradiância direta normal e o cosseno do ângulo zenital solar.
- Irradiância global horizontal (G): é a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. A irradiância global é dada pela soma:

$$G = G_{dif} + G_{dir} \equiv G = G_{dif} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$$

onde θ_z é o ângulo zenital.

- Irradiância no plano inclinado (G_i): é a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra. No caso de Brasília, a latitude é de $15^\circ 47'$.

A Figura 3.4 representa as componentes da irradiância solar:

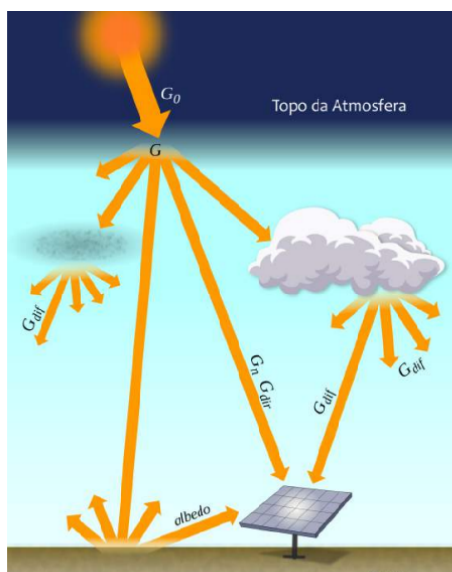


Figura 3.4: Componentes da Irradiância Solar(PEREIRA et al., 2017)

Segundo o Atlas Solar Brasileiro, a Região Nordeste apresenta uma irradiação global média de 5,9 kWh/m². Já a Região Centro-Oeste aparece em segundo lugar com uma irradiação global média de 5,7 kWh/m². Em seguida estão a Região Sudeste com uma irradiação global média de 5,6 kWh/m² e a região norte com 5,5 kWh/m². Por fim, a Região Sul aparece como a região com pior radiação solar, com 5,2 kWh/m². Mas com uma diferença apenas de 0,7 kWh/m² para a região mais ensolarada, que é a Nordeste. (PEREIRA et al., 2017)



Figura 3.5: Radiação Solar nas diferentes regiões brasileiras (PEREIRA et al., 2017)

Dados climatológicos e solarimétricos do Distrito Federal indicam média de irradiação no DF

de 5,8 kWh/m².ano (acima da média nacional). O que, associado a outros indicadores, como baixo índice de nebulosidade e pluviometria, além de temperatura média inferior à do Nordeste, faz com que a irradiação do DF seja excelente para a geração de energia solar fotovoltaica. (SOLAR, 2016)

3.3.1 APROVEITAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR

Cerca de 80% a 95% da radiação solar que incide sobre o painel fotovoltaico é absorvida pelo painel e 5% a 20% é refletida de volta para atmosfera. [Hipólito 2015]. Dessa radiação que é absorvida pelo painel, cerca de 45% é assimilada, e somente a radiação com comprimentos de onda na faixa da luz ultravioleta têm energia suficiente para livrar elétrons da estrutura atômica do respectivo material, criando o par elétron-lacuna e produzindo corrente elétrica. (GHENSEV, 2006)

A radiação solar com comprimento de onda na faixa da luz infravermelha, ou seja, com baixo índice de energia, não é suficiente para livrar o elétron de sua rede atômica e, portanto essa radiação atravessa o material da célula fotovoltaica e não é assimilada pela mesma. Já os fótons com alto valor energético são assimilados na forma de calor, gerando aquecimento da célula sem qualquer participação no processo de conversão de energia. O exato valor do nível de energia necessário para livrar um elétron de sua estrutura é respectivo a cada tipo de material e este é denominado de índice de bandgap. (GHENSEV, 2006)

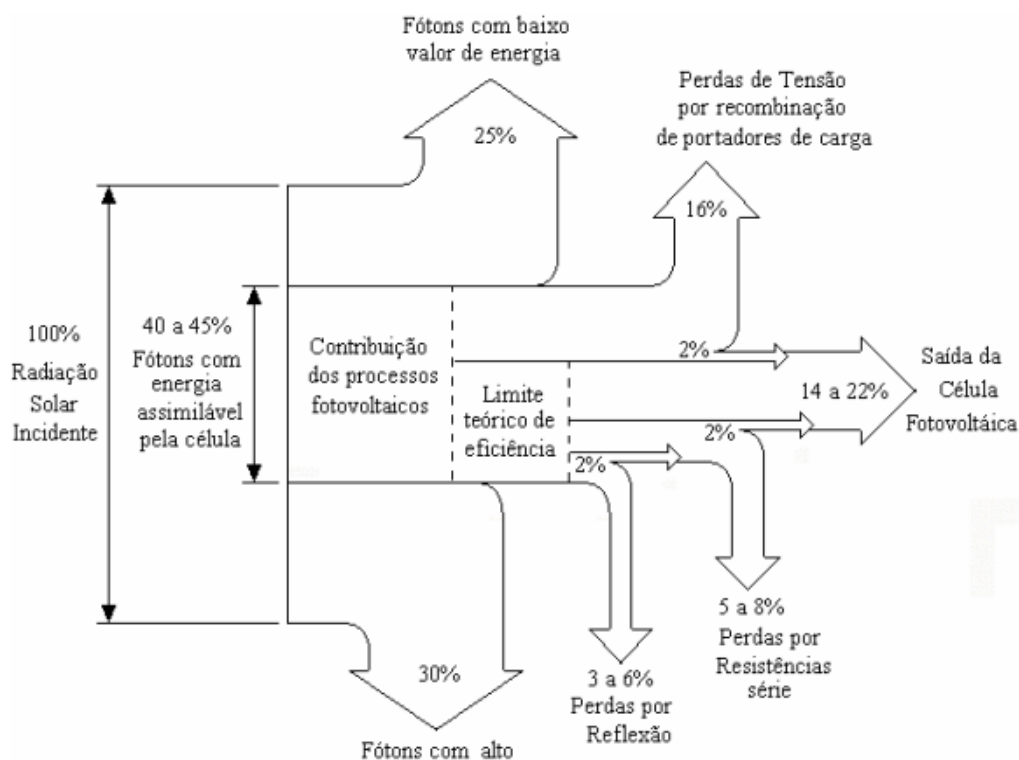


Figura 3.6: Índices percentuais de energia recebida e assimilada pela célula fotovoltaica (GHENSEV, 2006)

A Figura 3.6 ilustra os índices percentuais de energia, que mostram que da relação de 100% da radiação solar incidente sobre uma célula fotovoltaica, parcelas são dispersas no processo, onde 25% dessa não têm índice quantitativo suficiente para desencadear a processo de transferência de elétrons entre as bandas de valência e condução. Outros 30% da radiação solar incidente apresentam índices de energia muito acima do assimilável pela estrutura material da célula, dessa forma e energia é transformada em calor. Apenas a faixa correspondente ao espectro da radiação ultravioleta, que é em torno de 45% de todo o espectro da radiação solar incidente, é assimilada pela célula fotovoltaica, onde 15% é consumido pela recombinação dos pares elétrons-lacunas no material. Um índice de 5% a 8% da energia é consumido na estrutura interna do material, seja pelas microfissuras, pelas impurezas do material ou ainda pelos contatos de interconexão. Um valor de 3% a 6% é dispensado pelos efeitos de reflexões produzidos dos materiais semicondutores e apenas 14% a 20% é realmente obtido na relação de transformação de energia luminosa em elétrica. (GHENSEV, 2006)

3.3.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

A medição da radiação solar global, considerando tanto a componente direta como a componente difusa, na superfície terrestre, é de grande importância para os estudos das influências das condições climáticas e atmosféricas.

Com o histórico dessas medidas determina-se o potencial elétrico possível de ser gerado, e assim se viabilizam as instalações de sistemas de geração (fotovoltaica, heliotérmica ou térmica) em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano.

Além do potencial, esta instrumentação é de grande valia nos controles de eficiência da geração e na manutenção de todo o sistema.

O conjunto de equipamentos responsáveis por medir parâmetros solares, como radiação solar global, direta e difusa, entre outras é chamada de estação solarimétrica. Uma estação solarimétrica padrão é comumente formada por um piranômetro, que mede a irradiação solar global, um pireliômetro, que mede a irradiação solar direta, um anemômetro, para a medição da velocidade do vento, um higrômetro, para a medição da umidade relativa do ar, e um termômetro para a medição da temperatura do ar.

Para o presente trabalho, serão utilizados os dados de irradiação solar da estação solarimétrica instalada no Bloco G, da Faculdade de Tecnologia da UnB.

3.4 GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Os raios de Sol são compostos de partículas de luz chamados fótons, que ao atingirem os painéis solares fazem com que os elétrons das células fotovoltaicas se movimentem dentro do material semicondutor, criando assim uma corrente elétrica. (SOLARTHON, 2022)

Quando um fóton da radiação solar contendo energia suficiente atinge um elétron da banda de valência, este move-se para a banda de condução, deixando uma lacuna no seu lugar, a qual se comporta como uma carga positiva. Neste caso, diz-se que o fóton criou um par elétron-lacuna (SOLARTHON, 2022). A ilustração está representada na Figura 3.7:

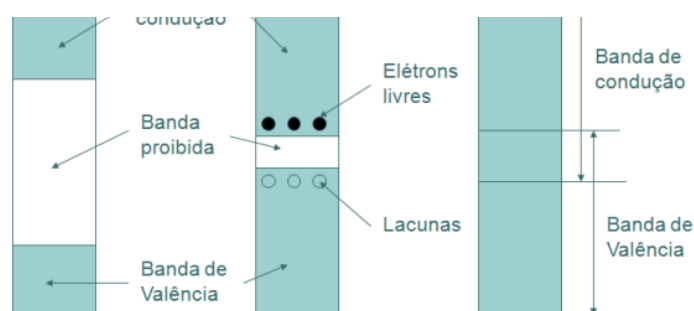


Figura 3.7: Bandas de Valência e Bandas de Condução. (SOLARTHON, 2022)

A ocorrência da corrente elétrica dá-se como segue: As células fotovoltaicas são basicamente constituídas por materiais tipo-N (com excesso de elétrons) e tipo-P (com excesso de lacunas, ou seja, com falta de elétrons). O sistema em si apresenta estabilização de cargas elétricas devido à barreira de potencial formada entre os materiais quando da junção dos mesmos. Se a radiação incidente em forma de fótons apresentar índices específicos de energia, assimiláveis pela estrutura do respectivo material semicondutor, os elétrons do material tipo-N ganham energia e tendem a deslocar-se em direção ao material tipo-P. O mesmo fenômeno ocorre no material tipo-P com as lacunas e estas tendem a deslocar-se em direção ao material tipo-N. Como resultado desse deslocamento de cargas, dá-se a neutralização de cargas na área da junção dos materiais, gerando um campo elétrico formando a zona de depleção, e separando os pares elétrons-lacunas. Essa neutralização ocorre quando não existe a incidência de fótons, e ela muda com a temperatura atingida pelas células fotovoltaicas. Uma parcela dos elétrons livres se recombinam junto às lacunas, devido às impurezas indesejadas e dos defeitos no interior das estruturas dos materiais. (GHENSEV, 2006)

Um coletor de cargas elétricas, formado por grades e cabeamento externo é disposto para drenagem de cargas majoritárias entre os materiais tipos P e N, os elétrons e lacunas se deslocaram por esses em sentido a unirem-se devido ao campo elétrico criado. O campo elétrico estabelecido entre os diferentes materiais, estabelece uma diferença de potencial (tensão elétrica, na forma de corrente contínua - Vcc) e o fluxo ordenado de elétrons, gerando a corrente elétrica que é empregada para suprir a energia necessária aos dispositivos e equipamentos eletroeletrônicos. Para cada tipo específico de material empregado na fabricação da célula fotovoltaica, tem-se um valor de diferença de potencial, onde para o Silício, obtemos o valor na ordem de 0,5 Volts (GHENSEV, 2006). A ilustração está representada na Figura 3.8:

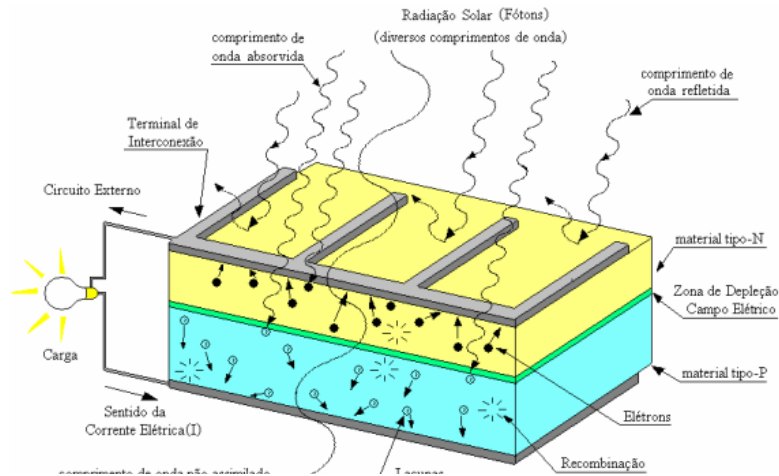


Figura 3.8: Modelo funcional de uma célula fotovoltaica.(GHENSEV, 2006)

3.4.1 ESTRUTURA MICROSCÓPICA

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra onde totalmente “vazia” (banda de condução). Um semicondutor bastante utilizado é o silício. Uma célula fotovoltaica constituída por cristais de silício puro não produziria energia elétrica. Os elétrons passariam para a banda de condução, mas acabariam por se recombinar com as lacunas, não dando origem a qualquer corrente elétrica. Para haver corrente elétrica é necessário que exista um campo elétrico, isto é uma diferença de potencial entre duas zonas da célula. Através do processo conhecido como dopagem do silício, que consiste na introdução de elementos estranhos com o objetivo de alterar as suas propriedades elétricas, é possível criar duas camadas na célula: a camada tipo p e a camada tipo n, que possuem, respectivamente, um excesso de cargas positivas e um excesso de cargas negativas, relativamente ao silício puro.(HECK, 2015)

O átomo de silício é formado por catorze prótons e catorze elétrons. Na camada mais exterior, conhecida como camada de valência, existem quatro elétrons. No cristal de silício, os átomos alinham-se segundo uma estrutura em teia (chamada teia de diamante), formando quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos. Em cada ligação covalente, um átomo partilha um dos seus elétrons de valência com um dos elétrons de valência do átomo vizinho. Como resultado desta partilha de elétrons, a camada de valência, que pode conter até oito elétrons, fica cheia: os elétrons ficam presos na banda de valência e o átomo está num estado estável. Para que os elétrons desloquem-se é necessário adquirir energia suficiente para passarem da camada de valência para a banda de condução. Esta energia é chamada de hiato (ou band gap energy) e no caso do cristal de silício vale 1,12 eV. (FILHO, 2007)

Na região onde os dois materiais se encontram, designada junção p-n, cria-se, portanto, um campo elétrico que separa os portadores de carga que a atingem: os elétrons, excitados pelos

fótons com energia suficiente para excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução, são acelerados para um terminal negativo, ao passo que os buracos são enviados para um terminal positivo. Nestas condições, ligando os terminais a um circuito que se fecha exteriormente através de uma carga, circulará corrente elétrica. (CASTRO, 2007)

O boro é o dopante normalmente usado para criar a região tipo p. Um átomo de boro forma quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos de silício, mas como só possui três elétrons na banda de valência, existe uma ligação apenas com um elétron, enquanto as restantes três ligações possuem dois elétrons. A ausência deste elétron é considerada uma lacuna, a qual se comporta como uma carga positiva que viaja através do material, pois de cada vez que um elétron vizinho a preenche, outra lacuna se cria. A razão entre átomos de boro e átomos de silício é normalmente da ordem de 1 para 10 milhões. O fósforo é o material usado para criar a região n. Um átomo de fósforo tem cinco elétrons na sua banda de valência, pelo que cria quatro ligações covalentes com os átomos de silício e deixa um elétron livre, que viaja através do material. A razão entre átomos de fósforo e de silício é próxima de 1 para 1000. (FRAIDENRAICH; LYRA, 1995)

Existem diversos tipos de painéis fotovoltaicos. Os de silício monocristalino e policristalino são dois deles. A principal diferença entre as tecnologias é o método utilizado na fundição dos cristais. Enquanto o monocristalino é feito a partir de um único cristal de silício ultrapuro fatiado em lâminas de silício individuais, transformadas em células fotovoltaicas, no policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, preservando a formação de múltiplos cristais.

3.4.2 ESTRUTURA MACROSCÓPICA

A Figura 3.9 ilustra a constituição interna de uma célula fotovoltaica típica:

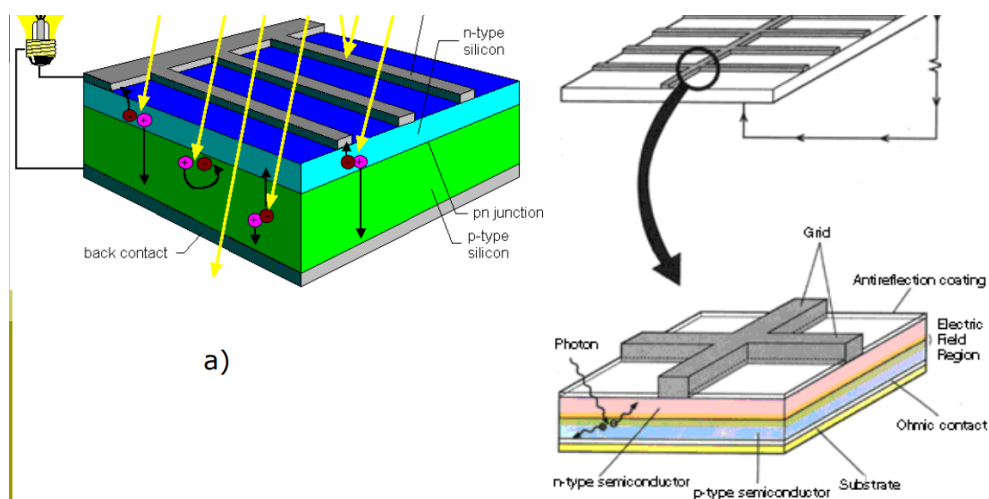


Figura 3.9: (a) Constituição interna de uma célula fotovoltaica típica; (b) Detalhes da constituição da grelha metálica. (STONE, 2007)

- Grelha e contatos frontais: os contatos frontais, em cobre, constituem os terminais negati-

vos.

- Película anti-reflexo: esta película reduz a reflexão da radiação incidente para valores abaixo de 5%; em conjunto com textura especiais usadas em células de alto rendimento a reflexão pode ser reduzida para valores da ordem de 2%; sem este revestimento a célula refletiria cerca de um terço da radiação.
- Camada tipo n: silício dopado com fósforo, constituindo a região negativa da célula; a espessura desta camada é cerca de $0,03\mu\text{m}$.
- Camada tipo p: silício dopado com boro, constituindo a região positiva da célula; a espessura desta camada é cerca de $250\mu\text{m}$.
- Contato de base: contacto metálico localizado na parte posterior da célula, que constitui o terminal positivo.

3.5 UTILIZAÇÃO DO MPPT PARA CONTROLE DE CARGA

Devido ao elevado custo inicial de instalação e à baixa taxa de conversão das células fotovoltaicas, o sistema deve estar otimizado para se retirar sempre a máxima potência possível. O ponto de potência máxima de um painel fotovoltaico é variável pois depende da radiação solar e da temperatura. Deste modo é utilizado um método de controle denominado *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), para se conseguir que o painel fotovoltaico opere no seu ponto de potência máxima. O controle MPPT tem como objetivo orientar o funcionamento do conversor no sentido de conseguir extrair do painel fotovoltaico, a cada instante, a maior potência possível. (ANICETO, 2010)

Apesar do painel fotovoltaico se comportar como uma fonte de corrente - capaz de criar uma corrente elétrica em um material semiconductor quando exposto à determinada frequência de radiação luminosa -, há uma limitação na geração de energia, uma vez que o painel não se comporta como uma fonte elétrica convencional, não apresentando tensão de saída constante em seus terminais. A potência elétrica é o produto tensão x corrente. A Figura 3.10 apresenta um gráfico onde são representadas as curvas das três grandezas elétricas de um painel fotovoltaico: tensão, corrente e potência:

A corrente elétrica depende da irradiação solar variando significativamente com a variação da intensidade da luz. A tensão elétrica é fortemente influenciada pela temperatura. O aumento da intensidade da luz incidente no módulo aumenta a temperatura das células, diminuindo a tensão do módulo, e conseqüentemente reduzindo sua eficiência. A tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura enquanto que a corrente sofre uma redução muito pequena. A curva de potência possui um ponto máximo, denominado MPP – *Maximum Power Point*. Esse é o ponto de operação, tensão e corrente, em que a célula consegue fornecer a maior quantidade de energia gerada, ou seja, é seu ponto de máxima transferência de potência para a carga. Outros

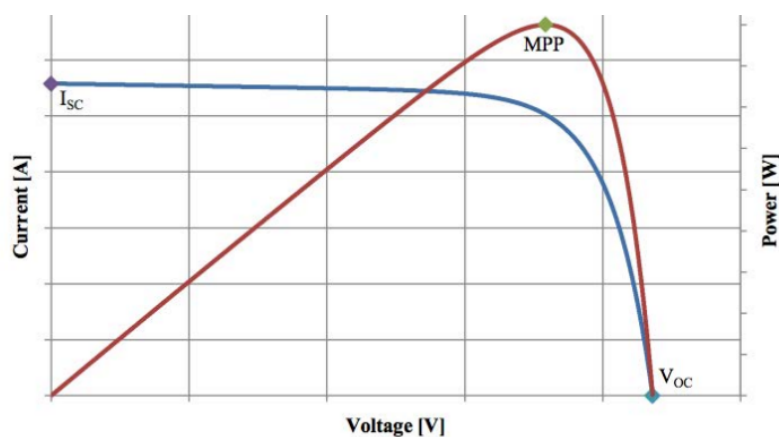


Figura 3.10: Curvas de corrente (azul) e potência (vermelha) em função da tensão de saída de um painel fotovoltaico. (JÚNIOR, 2015)

dois pontos podem ser observados: I_{SC} que representa o valor de corrente de curto-circuito do painel e V_{OC} que representa a tensão de saída com o circuito aberto. Esses são dois dos diversos parâmetros que um painel fotovoltaico possui e que são apresentados pelos fabricantes em seus catálogos. (JÚNIOR, 2015)

O MPPT monitora de forma contínua os parâmetros elétricos em sua entrada — fazendo ajustes em tempo real, garantindo que o aproveitamento da energia será o máximo na conversão de corrente contínua para corrente alternada. Assim, o MPPT otimiza a energia (buscando a melhor potência para funcionamento da placa solar). (NEOSOLAR, 2020)

A corrente e a tensão do painel são medidas por sensores no circuito eletrônico do inversor, esse valor é calculado pelo controlador MPPT, que envia a um Conversor Boost um sinal de referência. Um conversor boost, Figura 3.11, é por definição um conversor DC-DC que eleva a tensão de saída em relação a tensão de entrada de acordo com o ciclo de trabalho na chave S, também conhecido como Duty Cycle (D). (PERUZZO; JUNIOR, 2021)

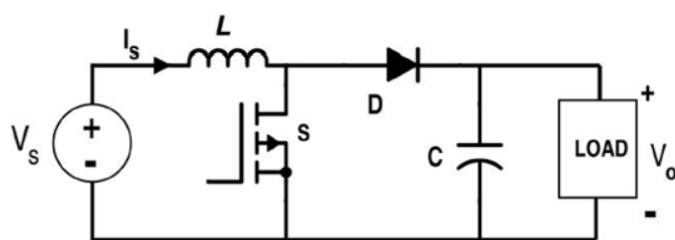


Figura 3.11: Conversor Boost. (PERUZZO; JUNIOR, 2021)

Quando aplicado a um inversor, o conversor boost não possui apenas a função de elevar a tensão de saída, mas também de regular a tensão de entrada. Os circuitos operam em malha fechada, portanto o feedback de potência gerada sempre altera os parâmetros de todos os elementos do circuito. (PERUZZO; JUNIOR, 2021)

Referenciando uma tensão de saída no Conversor Boost através da variação do valor de referência enviado pelo controlador MPPT, o Conversor “forçará” o Arranjo de Módulos Fotovoltaicos a operar na tensão em que o MPP está localizado. A potência gerada, então, é enviada ao conversor CC-CA, que transforma ela nos parâmetros da rede definidos pela concessionária local. (PERUZZO; JUNIOR, 2021)

O esquemático de ligação do MPPT ao painel está representado na Figura 3.12.

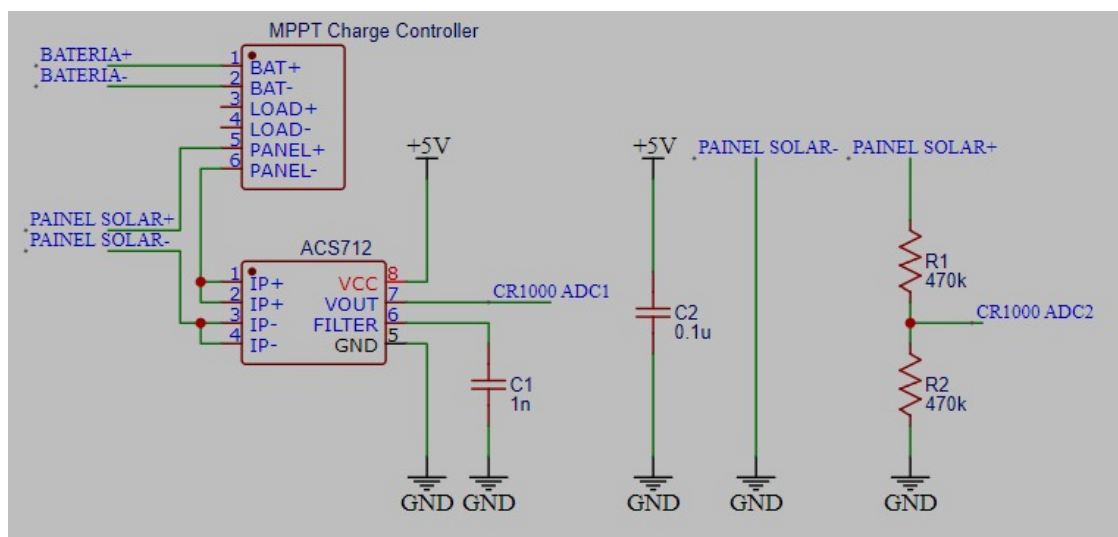


Figura 3.12: Esquemático elétrico do sistema de medição da potência do painel solar. (Fonte: André Mariano)

3.6 TIPOS DE RASTREADORES SOLARES

O rastreamento solar é uma tecnologia que visa aumentar a produção de energia direcionando a placa fotovoltaica para a posição do Sol durante todo o dia.

Em geral, a radiação solar coletada pelos módulos fotovoltaicos, montada em um sistema de rastreamento, é maior do que a radiação coletada em um sistema fixo, mesmo que este esteja exposto ao Sol por um período maior.

3.6.1 RASTREADORES DE EIXO ÚNICO

O rastreador de eixo único tem grau de movimento que atua em apenas um eixo de rotação. O seu eixo de rotação é normalmente alinhado conforme a localidade da placa fotovoltaica. Existem dois tipos de rastreadores de eixo único:

- Rastreador de eixo único horizontal: O sistema de rotação deste tipo de seguidor de eixo único é horizontal em relação ao solo. Ele possui tipicamente a face do módulo orientada paralelamente ao eixo de rotação. O poste do eixo de rotação pode ser compartilhado, diminuindo assim o custo de instalação. (FARICELLI, 2018)

- Rastreador de eixo único vertical: o sistema de rotação deste tipo de seguidor de eixo único é vertical em relação ao solo. Este tipo de rastreador é mais eficaz em latitudes elevadas do que o rastreador de eixo horizontal. Eles giram de leste a oeste. Os layouts de campo para instalação devem considerar sombreamentos. Na Figura 3.13 é possível observar o funcionamento do rastreador solar de eixo simples. (ANTONI; PEREIRA, 2014)

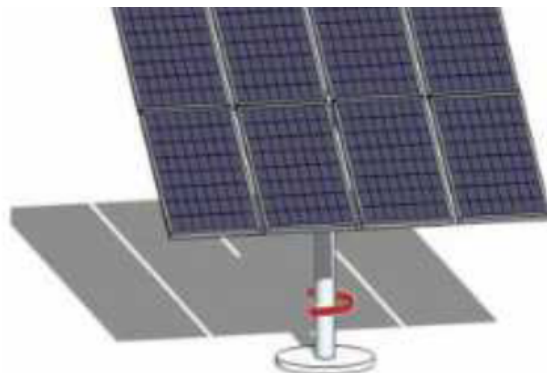


Figura 3.13: Rastreador solar de eixo simples horizontal. (ORTIZ et al., 2018)

3.6.2 RASTREADORES DE EIXO DUPLO

Rastreadores de eixo duplo possuem a captação solar otimizada, pois têm a capacidade de seguir o Sol verticalmente e horizontalmente, possuindo assim dois graus de movimento. Existem dois tipos de rastreadores de eixo duplo, são eles:

- Ponta - inclinação: A matriz é montada na parte superior de um poste. Normalmente, o movimento leste-oeste é conduzido pela rotação da matriz em torno do topo do pólo. No topo do rolamento rotativo há um mecanismo em forma de T ou H que fornece a rotação vertical dos painéis e fornece os principais pontos de montagem para a matriz. (FARICELLI, 2018)
- Azimute - altitude: Um seguidor de eixo duplo de azimute-altitude tem seu eixo primário (o eixo azimute) vertical em relação ao chão. O eixo secundário, muitas vezes chamado de eixo de elevação, é então tipicamente normal ao eixo primário. Na Figura 3.14 é possível observar o funcionamento do rastreador solar de eixo duplo. (ANTONI; PEREIRA, 2014)

Neste trabalho de conclusão de curso, será analisada a eficiência de um rastreador de eixo duplo, do tipo azimute.

3.6.3 RADIAÇÃO COLETADA PELO PAINEL FIXO E PELO RASTREADOR

No painel fixo, a principal radiação captada é a radiação direta, que é a aquela que incide diretamente sobre o painel, sem sofrer qualquer influência.

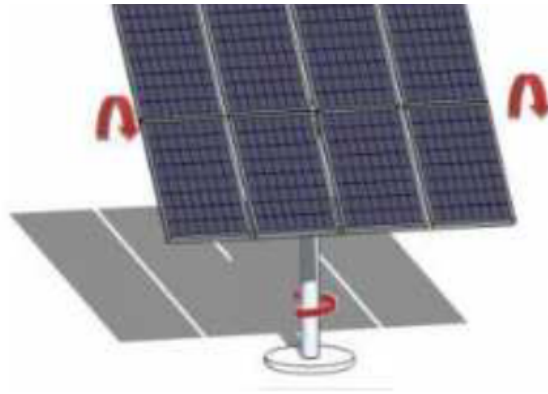


Figura 3.14: Rastreador solar de eixo duplo. (ORTIZ et al., 2018)

Já o rastreador solar, é capaz de captar a radiação direta, bem como o painel fixo, mas também a radiação difusa, que atinge a superfície solar após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre.

3.6.4 COMPORTAMENTO DOS PAINÉIS COM RELAÇÃO À TEMPERATURA E À RADIAÇÃO SOLAR

A corrente elétrica que o painel fotovoltaico pode fornecer depende diretamente da intensidade da irradiância que incide sobre suas células. O efeito da intensidade da radiação solar incidente na produção de energia do painel foi estudado por (JÚNIOR, 2015) e é apresentada na Figura 3.15, onde foram apresentados dois gráficos, um para a curva IxV e outra para a curva PxV para três valores de intensidade de radiação solar. Além disso, foram utilizados os valores por unidade – p.u., para que a ordem de grandeza dos valores fossem verificados, sendo utilizados como valores de base os valores de corrente de curto-circuito e de tensão em circuito aberto.

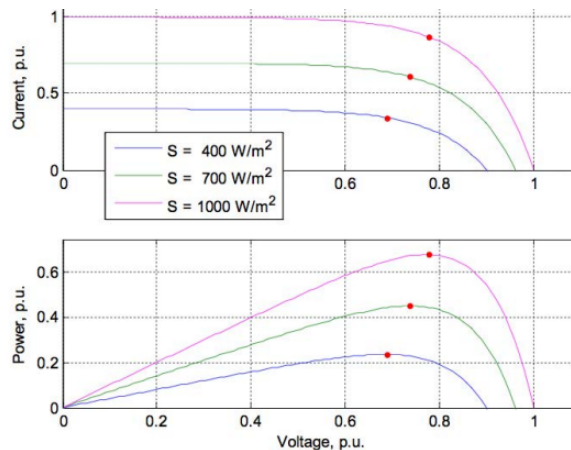


Figura 3.15: Curvas IxV e PxV para temperatura constante (25 [°C]) para três valores de intensidade de radiação solar diferentes. (MORALES, 2010)

Da mesma forma que a intensidade de radiação solar, a temperatura de operação do painel também influencia sua tensão de saída. A Figura 3.16 apresenta dois gráficos, assim como na Figura 3.15, em p.u., para três valores de temperatura de operação do painel fotovoltaico, para

uma radiação solar constante de 1 [kW/m^2].

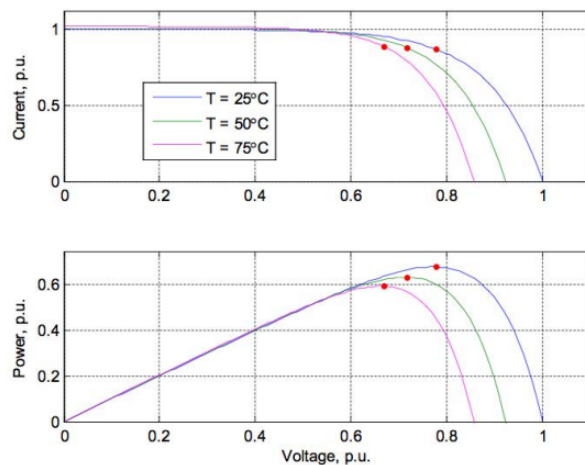


Figura 3.16: Curvas $I \times V$ e $P \times V$ para radiação solar constante de 1 [kW/m^2] para três valores de temperatura. (MORALES, 2010)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ANÁLISE MECÂNICA DO RASTREADOR

Como o foco deste Projeto de Graduação é a comparação da energia gerada pelo painel fotovoltaico fixo e pelo rastreador solar, e não o projeto mecânico do rastreador, ele foi construído a partir de componentes que estavam disponíveis no Laboratório, como: perfis de alumínio (barra chata, perfil "L" e tubo de seção quadrada), par de engrenagens de betoneira, vergalhão de ferro para o balanceamento da estrutura, etc.

O esboço da montagem está representado na Figura 4.1



Figura 4.1: Projeto do rastreador. Note que na figura não foram desenhados os contrapesos

O rastreador é dividido em dois sistemas mecânicos principais:

1) O primeiro, responsável pela movimentação do rastreador ao longo da trajetória azimutal, é composto por um motor DC de 12V e velocidade nominal de 3rpm, que está acoplado a um eixo, que por sua vez, está acoplado à engrenagem de 18 dentes, conforme ilustrado na Figura 4.2. A engrenagem menor (18 dentes) transmite à engrenagem maior (75 dentes) a velocidade de 0,72rpm, uma vez que há uma redução de 4,16 entre as engrenagens.



Figura 4.2: Eixo que transmite torque do motor para a engrenagem de 18 dentes.

Um rolamento axial de esferas - utilizado em mesas giratórias - foi fixado à parte de baixo da engrenagem de 75 dentes por meio de quatro parafusos, e tem a função de permitir a livre movimentação da engrenagem maior. Acima da engrenagem de 75 dentes foi colocada uma chapa redonda de aço, nessa base foi fixada a haste de sustentação do painel fotovoltaico, o que pode ser verificado nas figuras Figura 4.3 e Figura 4.4.

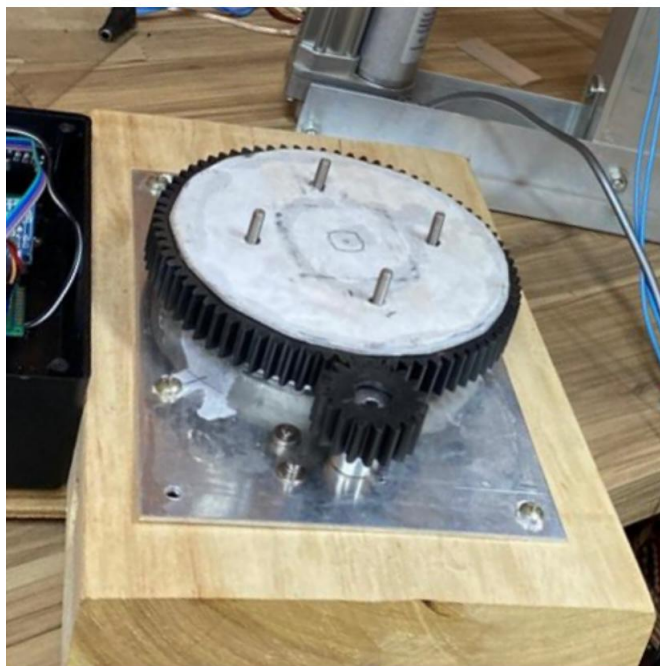


Figura 4.3: Conjunto rolamento axial, engrenagem maior e chapa metálica



Figura 4.4: Haste de sustentação do painel fixada à chapa metálica e ao conjunto rolamento axial e engrenagem maior.

2) O segundo sistema mecânico é responsável pela elevação e funciona a partir de um atuador mecânico. O eixo de elevação funciona como um mecanismo de 4 barras, em que o atuador linear seria a barra que proporciona movimento ao mecanismo (l), o painel fotovoltaico seria a barra que recebe o movimento (p), a barra superior seria a base em que está fixada a haste de sustentação do painel (s) e há também uma barra imaginária (q). O esquema pode ser visualizado na Figura 4.5:

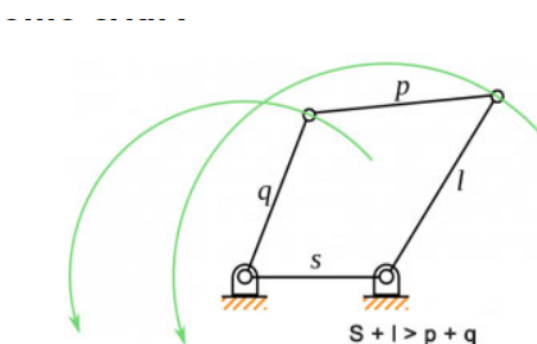


Figura 4.5: Mecanismo de 4 barras.

4.1.1 CÁLCULO DAS DISTÂNCIAS

Em um primeiro momento, foi definido que o maior ângulo de elevação da placa seria menor que 90° para que a estrutura que sustenta o painel não fosse muito forçada. O ângulo adotado foi de 87° . A partir disso, foi definido o comprimento da haste de sustentação, levando em considera-

ção que o comprimento do atuador fechado é de 40,5cm e que o atuador deveria estar localizado na base superior do painel fotovoltaico para garantir a elevação até o ângulo de 87°, o comprimento que satisfizes essas duas condições foi o de 39cm.

No segundo momento, foram feitos os cálculos para determinar a que distância da base da haste de sustentação o atuador deveria ser instalado. O esquemático está representado na Figura 4.6:

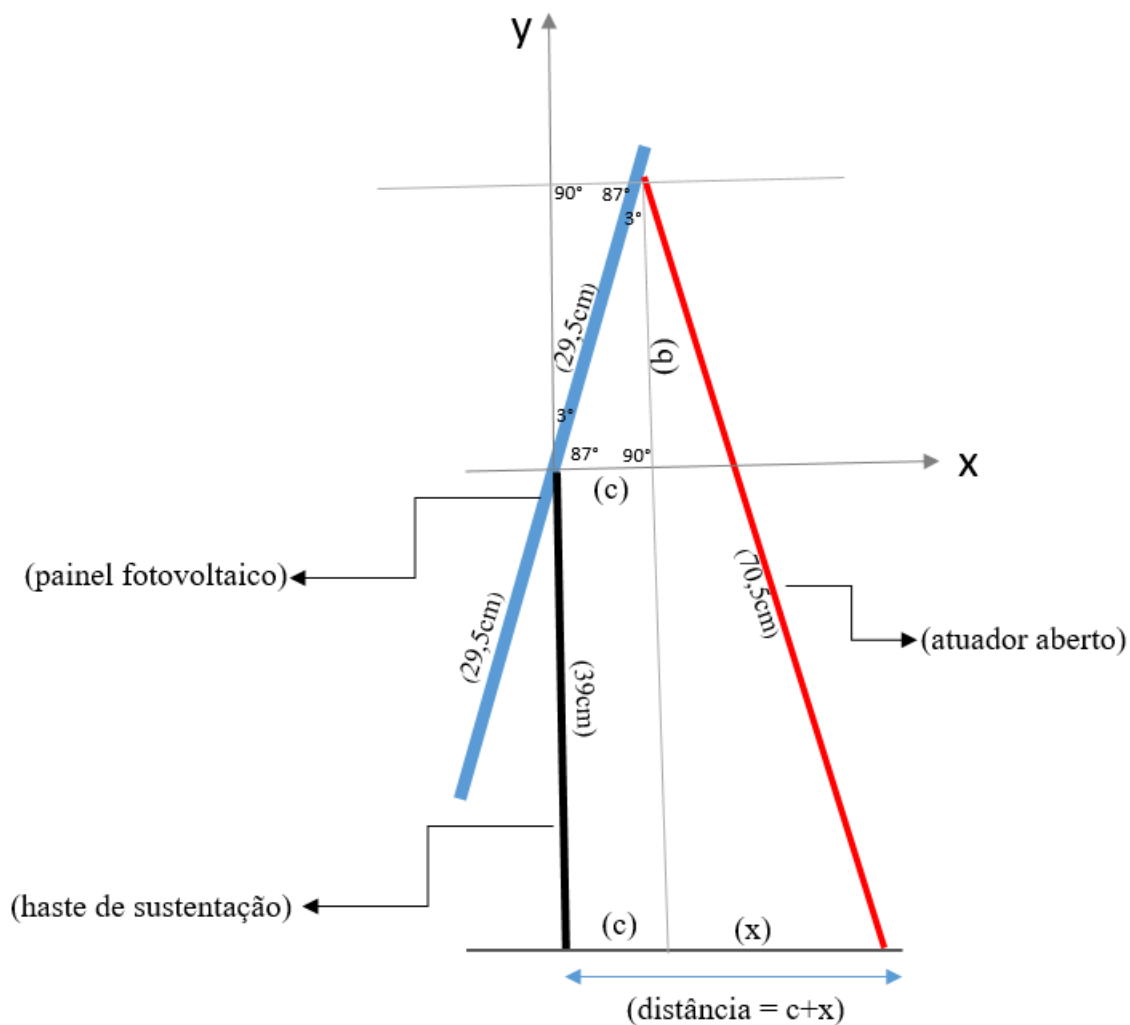


Figura 4.6: Esquemático para o cálculo das distâncias

A partir dos cálculos utilizando razões trigonométrica, como a Lei dos Senos, foi encontrado que a distância que o atuador deve estar da base da haste, ou seja, $c + x = 19cm$. Esse resultado satisfizes as duas conformações do atuador linear, aberto e fechado. O memorial de cálculo pode ser visto nos anexos.

4.2 RASTREAMENTO DO SOL

O processo de rastreamento do Sol, ou seja, a manutenção da perpendicularidade da placa fotovoltaica ao ângulo dos raios solares diretamente incidentes, é feita em dois estágios. Primeiramente, o equipamento localiza o Sol através da caixa localizadora com seus quatro fotorresistores (LDR - do inglês Light Dependent Resistor). Eles estão organizados de forma que, para que todos estejam simultaneamente iluminados diretamente pelo Sol, a caixa necessariamente precisa estar perpendicular aos raios incidentes. Como a caixa está montada de forma coplanar com a placa fotovoltaica, esse primeiro estágio garante a posição de início de curso, em que as quatro extremidades estão iluminadas pelo Sol. A caixa está representada na Figura 4.7.

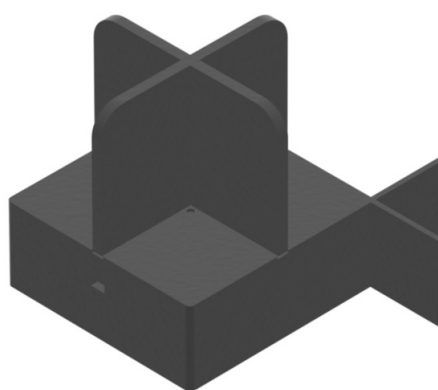


Figura 4.7: Caixa localizadora

Após isso, o segundo estágio se inicia. Nele, o equipamento segue a trajetória do Sol descrita em carta solar, de acordo com tabela gerada pelo programa Matlab, sempre com passos de 3° em cada eixo. Durante essa movimentação, dois encoders digitais (Lpd3806-600bm) fazem leituras de posição de cada eixo com taxa de atualização de 10kHz e servem para fechar uma malha de controle da trajetória. Os códigos da carta solar e do rastreamento estão disponíveis nos anexos.

4.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição da geração elétrica da placa fotovoltaica foi implementado com um sensor de corrente (ACS712) conectado em série com a placa. Os dados foram lidos e armazenados no arduino. O esquemático dessa ligação pode ser visto na figura 3.12.

É importante notar que o terminal negativo do painel solar está conectado ao terra do sistema digital. Essa conexão não fecha circuito e portanto não há fluxo de corrente, mas ela coloca o

painel no mesmo referencial de tensão elétrica que o sistema de medição. Além disso, o divisor resistivo foi escolhido com alta impedância a fim de minimizar o impacto sobre a geração do painel.

O esquemático de instrumentação do equipamento pode ser visto na figura 4.8. É importante notar alguns detalhes nesse circuito: primeiramente, a polaridade de ligação dos motores DC não é importante visto que o driver L298N possui formato interno de ponte H e pode acionar os motores em ambas as direções. Além disso, os pinos de entrada do driver precisam todos estar ligados em pinos GPIO do arduino que tenham capacidade de gerar sinal PWM para que o controle de velocidade possa ser feito.

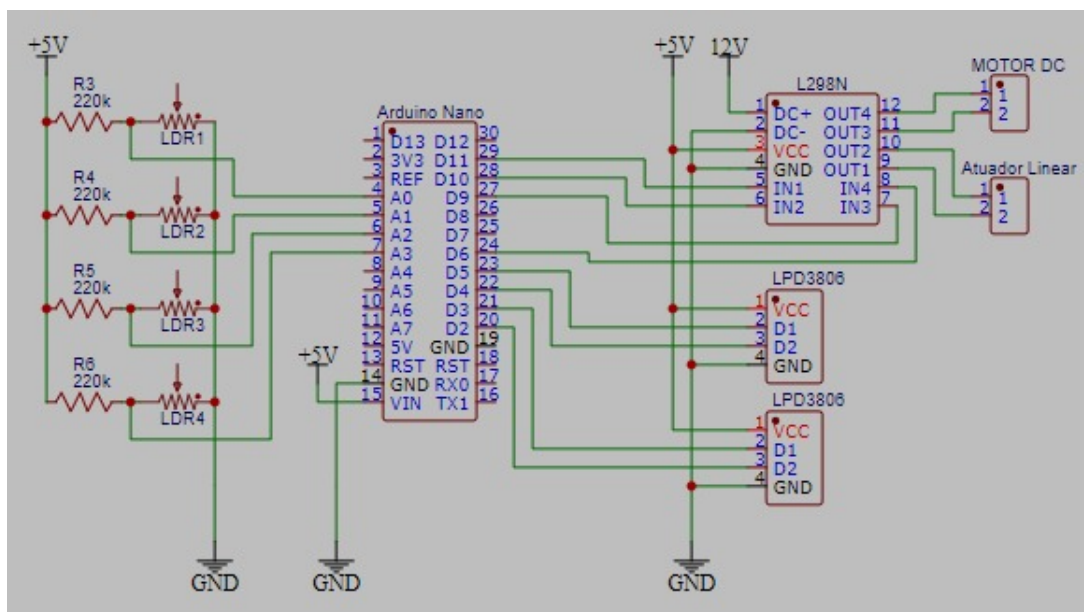


Figura 4.8: Esquemático elétrico da instrumentação do equipamento de rastreamento. (Fonte: André Mariano)

A radiação solar global é medida através de um piranômetro LI200 da marca LI-COR. A temperatura atingida pelos painéis foi aferida através de termopares conectados às placas na parte superior e inferior.

4.4 MATERIAIS UTILIZADOS

- 2x painel solar de 55W;
- 1x suporte para o painel fixo;
- 1x base de madeira para o rastreador;
- 1x motor 12v DC, com caixa de redução reversível 3 rpm , Marca TEK8;
- 2x Arduino nano;

- 2x Placa perfurada universal, componentes eletrônicos (feitas à mão, uma pra conectar o arduino e outra pra conectar os LDR);
- 1x Driver p/ motor DC L298N;
- 2x Encoder LPD3806 G5 600BM;
- 1x Sensor de corrente ACS712;
- 1x Fonte chaveada 12 V 1.5A;
- 1x Atuador linear;
- 1x motor DC com caixa de redução;
- 1x datalogger CR1000;
- 4x termopares;
- 1x MPPT (que foi compartilhado pelos dois painéis);
- Perfis de alumínio (barra chata, perfil "L" e tubo de seção quadrada).

5. RESULTADOS

5.1 TESTE DO RASTREADOR

No dia 30/08 foi realizado um teste experimental com o rastreador solar a fim de verificar se o equipamento estava funcionando de maneira adequada. O teste que foi feito consistiu em localizar o Sol por meio da caixa localizadora, e após isso começar o rastreamento com base na carta solar. Os dados obtidos estão apresentados no gráfico da Figura 5.1, que mostra que em nenhum momento a placa fotovoltaica perdeu a perpendicularidade com o Sol, uma vez que nenhum dos LDR's apresentou uma queda no valor da leitura. O teste foi feito entre o período de 15h às 18h ao lado do Bloco G da Universidade de Brasília.

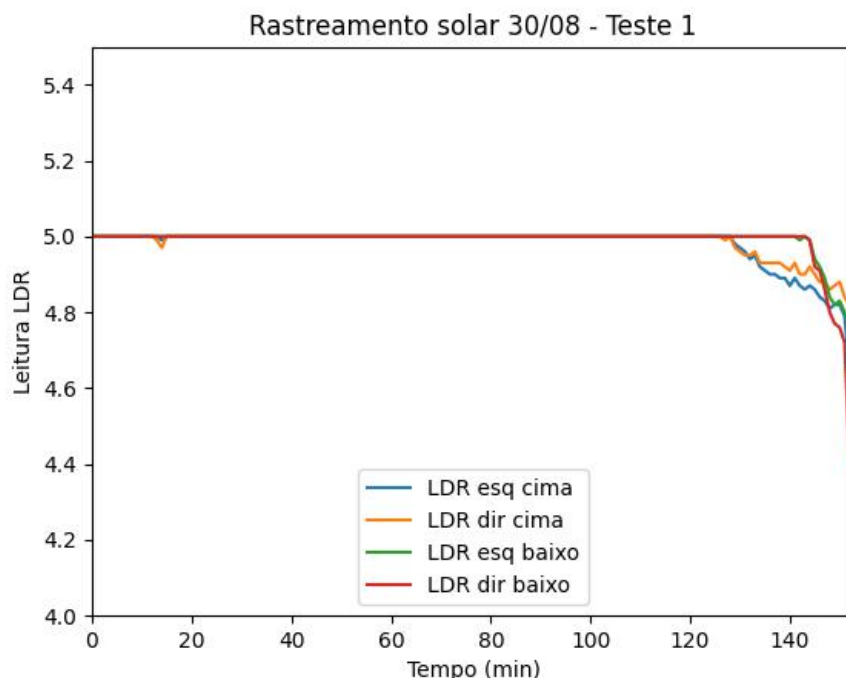


Figura 5.1: Teste do rastreador.

5.2 TESTE DE GERAÇÃO

Nos dias 29/09 e 30/09 foram realizados testes experimentais a fim de comparar a geração de energia do painel fotovoltaico fixo com o painel com rastreamento. Também foi aferida a temperatura dos painéis, temperatura ambiente e radiação solar captada por cada painel. Os painéis foram posicionados no estacionamento do Bloco G, da Universidade de Brasília.



Figura 5.2: Teste de geração.

5.2.1 RADIAÇÃO SOLAR E TEMPERATURA AMBIENTE

No dia 29/09, o céu ficou livre de nuvens durante o período da manhã/começo da tarde, e no restante do dia houve variação entre nublado e ensolarado. Nota-se que no período de 10h às 11h, o rastreador captou uma maior quantidade de radiação solar que o painel fixo. Já no período de 11h até 13h a radiação solar captada pelas duas placas não teve diferença significativa, isso se deve ao fato de que próximo ao meio dia o Sol está próximo do zênite, ou seja, passando quase que perpendicularmente ao plano da terra, isso faz com que a radiação recebida pelo painel fixo seja muito próxima à radiação recebida pelo painel com rastreador. Neste período o céu estava limpo e com poucas nuvens. No período que vai de 13h15 às 14h, o céu ficou bastante encoberto por nuvens, por isso a radiação diminuiu em ambos os painéis. Após as 14h, o tempo alternou entre ensolarado e nublado até o final do dia, o que causou muitos picos no gráfico. Entretanto, é possível notar que próximo às 15h a radiação incidente no painel com rastreamento se sobressaiu à radiação incidente no painel fixo, o que era esperado, uma vez que as maiores diferenças entre os dois painéis ocorrem no começo e no final do dia.

No dia 30/09, o céu estava limpo no começo da manhã e no meio/final da tarde. Durante o período que vai do fim da manhã/começo da tarde, houve muitos períodos em que o céu esteve encoberto por nuvens. Entre 9h28 e 10h36 a radiação solar captada pelo rastreador foi maior àquela captada pelo painel fixo. O mesmo aconteceu no período que vai de 14h34 às 17h07.

Durante esse período o céu ficou predominantemente limpo e sem a presença de nuvens, o que favorece a captação da radiação solar pelo painel com rastreamento. Entre o período de 10h53 às 14h17 o céu ficou parcialmente encoberto. Esse fato explica a grande quantidade de picos da radiação no gráfico. Durante esse período, a radiação solar incidente nos painéis deveria ter sido bem próxima, pois é o horário em que o painel fixo tem sua geração otimizada.

Os gráficos da radiação solar estão representados na Figura 5.3

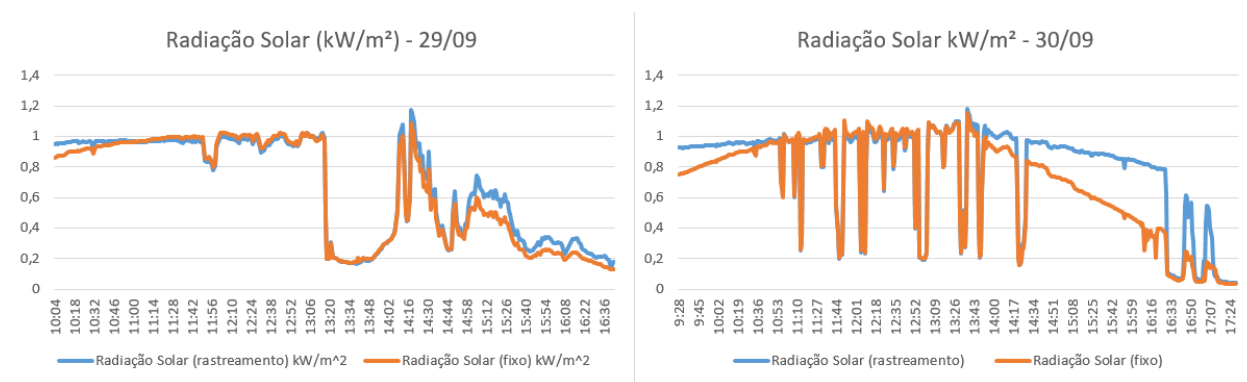


Figura 5.3: Radiação solar incidente nos painéis.

Também foi aferida a temperatura ambiente nos dois dias de teste. Os gráficos estão representados na Figura 5.4

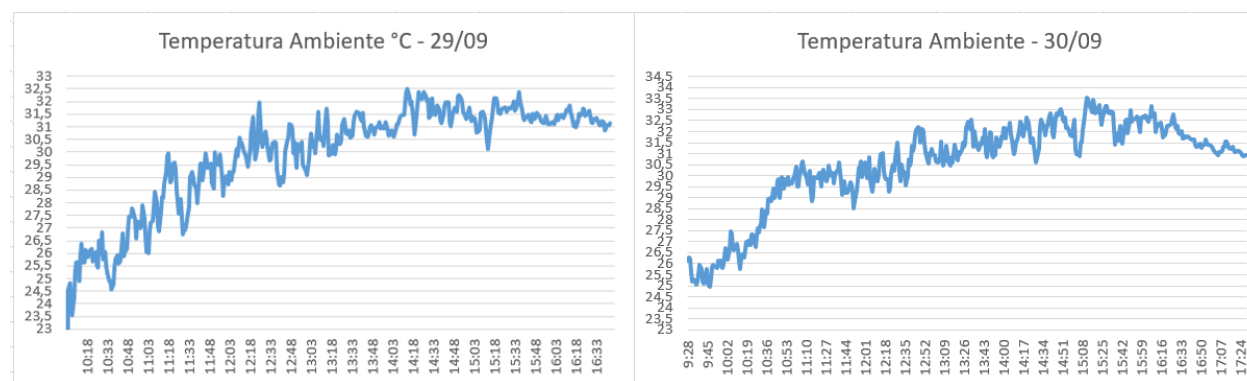


Figura 5.4: Temperatura ambiente.

A temperatura máxima no dia 29/09 foi de 32,52°, registrada às 14h14 e a mínima foi de 24°, às 10h06. Já a temperatura máxima no dia 30/09 foi de 33,55°, registrada às 15h12 e a mínima foi de 25,1°, às 10h42.

5.2.2 TEMPERATURA ATINGIDA PELOS PAINÉIS

Através de termopares fixados à parte superior e inferior dos dois painéis, foi possível aferir as temperaturas atingidas por eles. Os gráficos estão representados na Figura 5.5 e na Figura 5.6

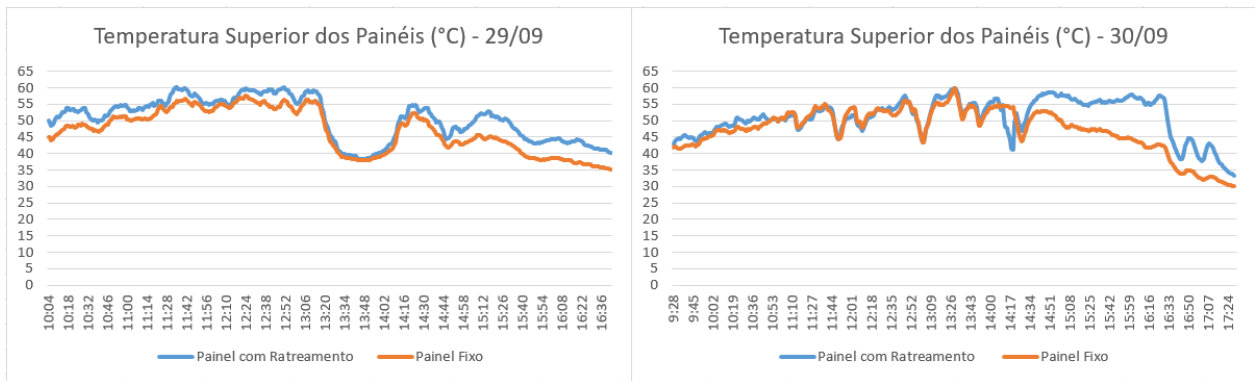


Figura 5.5: Temperatura superior dos painéis.

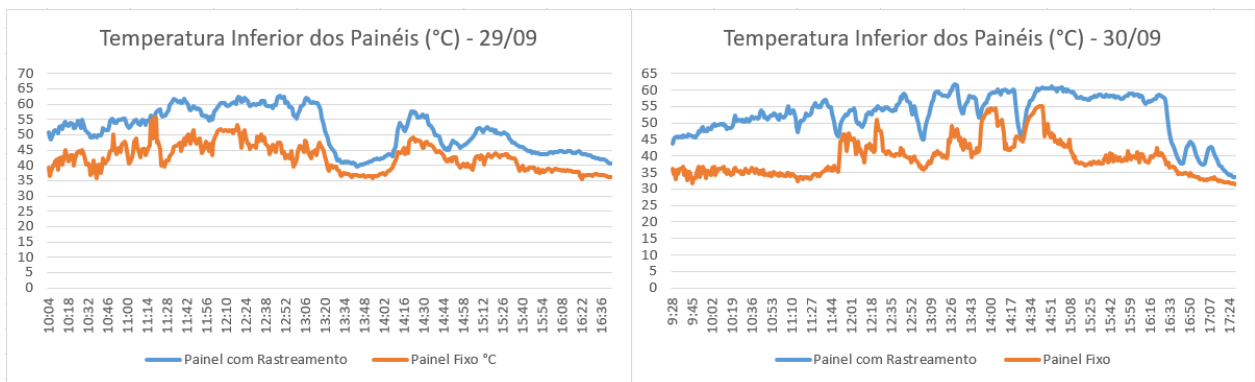


Figura 5.6: Temperatura inferior dos painéis.

Através dos gráficos, é possível notar que a temperatura atingida pelo rastreador solar foi maior do que a atingida pelo painel fixo nos dois dias. Esse fato já era esperado, uma vez que, por acompanhar a trajetória do Sol ao longo do dia, o rastreador fica mais exposto à radiação solar e a temperatura das células fotovoltaicas atingem maiores valores.

Uma nota importante é que a temperatura atingida pelos módulos fotovoltaicos foi muito superior a temperatura ambiente aferida. Enquanto que no dia 29/09 a temperatura do rastreador atingiu valores próximos a 63°C e o painel fixo 57°C, a temperatura ambiente não passou de 33°C. E no dia 30/09 a temperatura do painel rastreado chegou próxima a 62°C e a do painel fixo 60°C, que também é muito superior à máxima temperatura ambiente registrada no dia, que foi próxima de 33,5°C.

Através dos gráficos da Figura 5.5 e da Figura 5.6, é possível verificar que a temperatura atingida pelos painéis na parte inferior é um pouco maior àquela atingida pela parte superior. Isso se deve ao fato de que o termopar da parte superior foi afixado ao vidro do painel, que apesar de ter sua temperatura bastante elevada, não alcança a temperatura atingida pelos módulos fotovoltaicos. O termopar fixado na parte inferior dos painéis tem uma leitura mais clara da temperatura atingida pelos módulos.

5.2.3 CORRENTE

Também foi analisada a corrente elétrica gerada por cada um dos painéis, o resultado está representado no gráfico da Figura 5.7

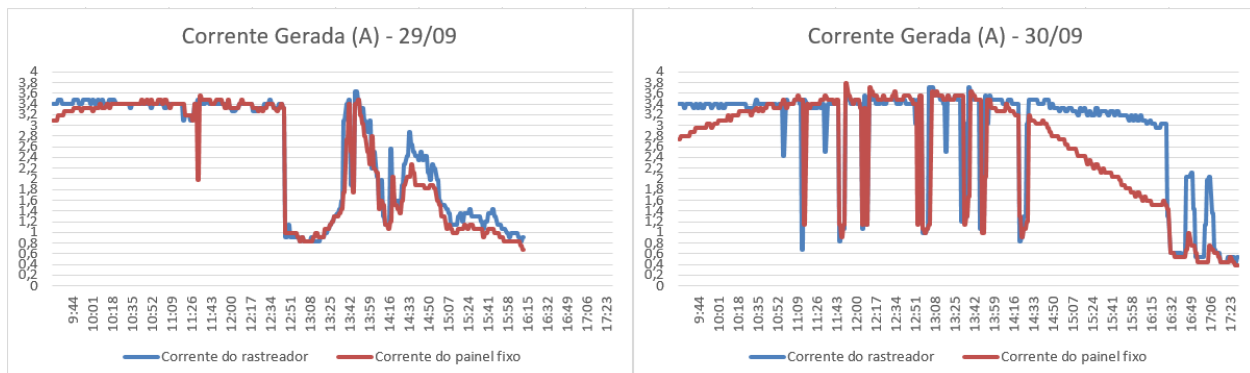


Figura 5.7: Corrente gerada pelos painéis.

Os gráficos da corrente gerada tiveram um comportamento muito parecido com o gráfico da radiação solar, o que já era esperado, uma vez que a corrente produzida pelo painel é proporcional à radiação incidente.

Pode-se notar que no dia 29/09, no começo e final do dia, a corrente gerada pelo rastreador é maior do que a corrente gerada pelo painel fixo. No começo da medição o rastreador estava produzindo uma corrente de 3,41A enquanto o painel fixo gerou 3,1A. No período que vai de 10h08h às 13h45, a corrente das duas placas tiveram valores muito próximos e, como houve a presença de muitas nuvens (representadas pelos picos no gráfico), a geração de corrente nos dois painéis diminuiu significativamente. A partir das 14h a corrente do painel fixo diminuiu e a corrente do painel com rastreamento chega a ser 112,39% maior. A corrente máxima gerada pelo rastreador foi de 3,63A enquanto ao do painel fixo foi 3,48A.

No gráfico do dia 30/09 é possível visualizar uma diferença de geração mais significativa no começo e no final do dia do que no dia 29/09. Isso porque o céu ficou claro e sem a presença de nuvens nesse período. No começo da medição o rastreador produziu uma corrente de 3,41A, enquanto o painel fixo produziu 2,73A. A geração do painel com rastreamento foi superior até às 10h30, e ficou variando muito até às 14h30. Durante esse período o tempo variou entre ensolarado e nublado por diversas vezes. Das 14h30 até 16h30 o céu ficou limpo e a geração do rastreador se sobressaiu muito em detrimento do painel fixo, nesse período a geração do rastreador chegou a ser 150% maior. A partir das 16h30 houve algumas nuvens, mas a geração do rastreador continuou mais alta.

Um fato interessante nos dois gráficos é que no período próximo ao meio dia, quando os dois painéis recebem valores muito próximos de radiação, o painel fixo gerou uma corrente um pouco maior do que o painel com rastreamento. Esse fato pode estar relacionado pelo aumento da temperatura no painel com rastreador.

5.2.4 POTÊNCIA E EFICIÊNCIA

As potências foram calculadas utilizando a equação a seguir:

$$P = I^2 \cdot R \quad (5.1)$$

Em que I é o valor da corrente medido em ampere e R é a resistência interna do resistor de carga, que tem valor nominal de 4,8 ohms. Inicialmente, a potência seria calculada como sendo o produto da corrente pela tensão, entretanto, como o Arduino utilizado não possuía mais capacidade de armazenamento, foi utilizada a resistência.

Os resultados estão representados nos gráficos da Figura 5.8:

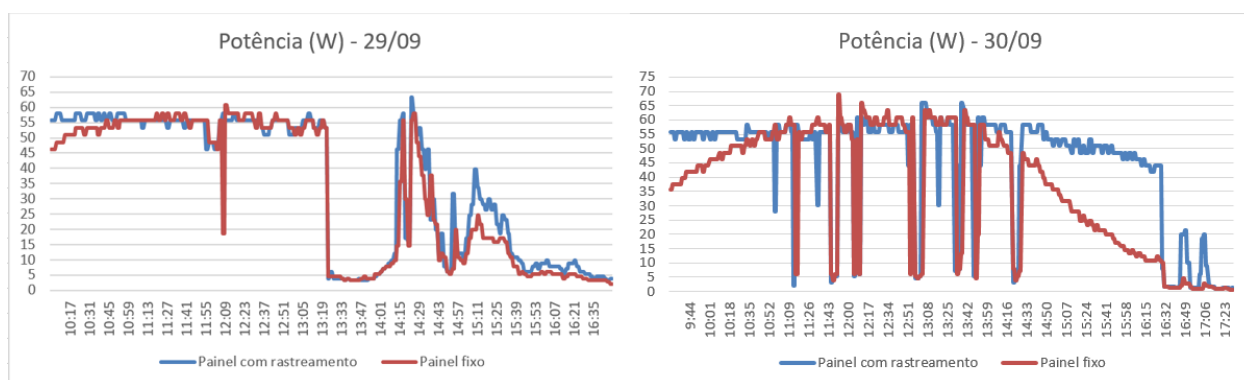


Figura 5.8: Corrente gerada pelos painéis.

Os resultados das potências estão dentro do esperado e seguiram o mesmo padrão de comportamento da radiação solar e da corrente elétrica já analisados. Nos períodos em que não houveram nuvens a potência foi otimizada, e o rastreador se sobressaiu em relação ao painel fixo. Nos períodos nublados a potência dos dois painéis diminuiu e teve valores muito próximos. Já próximo ao meio dia, a potência do painel fixo foi levemente superior à potência do rastreador, o que pode ser explicado pelo aumento da temperatura do rastreador. O *data sheet* dos painéis especifica que, para cada 1°C de aumento da temperatura a partir dos 25°C, pode haver uma diminuição de 0,45% de potência.

Foram feitos os cálculos de eficiência dos dois painéis, entretanto, o valor encontrado foi inferior ao que se esperava, principalmente no período da manhã e no final da tarde. Uma explicação para isso é que no cálculo da potência foi adotado que o valor da resistência da carga seria constante, entretanto, sabe-se que alguns fatores podem afetar o valor dessa resistência, como por exemplo a solda, temperatura atingida pelo resistor, etc. Dessa forma, a análise das eficiências foi inconclusiva. Uma sugestão para trabalhos futuros e calcular a potência dos painéis com base na sua tensão e não na resistência e comparar os resultados obtidos.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso analisou os resultados experimentais de vários autores que concluíram que, embora o rastreador tenha alguns picos de perda de eficiência por causa do aumento da temperatura dos painéis em determinadas horas do dia, a geração de energia não é afetada por isso, ou seja, o ganho de potência gerada pelo sistema com rastreamento é superior a perda de potência causada pelo aumento da temperatura. Em todas as referências aqui analisadas, a geração de energia de um painel com rastreador solar se sobressaiu em detrimento do painel com a placa fixa.

Já os testes experimentais realizados neste trabalho concluíram que o rastreador recebeu uma maior quantidade de radiação solar nos períodos em que o céu estava limpo e sem nuvens, o que favoreceu a geração de corrente e a potência, confirmando o fato de que o rastreador tem um aumento na geração, principalmente pela incidência da radiação direta em dias predominantemente claros. Nos períodos nublados, a geração dos dois painéis é muito baixa e tem valores próximos. E no período próximo ao meio dia, a geração do painel fixo foi um pouco maior que a geração do rastreador, o que pode ser explicado com base na temperatura atingida pelo painel rastreado. O *data sheet* dos painéis especifica que, para cada 1°C de aumento da temperatura a partir dos 25°C, pode haver uma diminuição de 0,45% de potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ENERGIA, M. D. M. E. Resenha energética brasileira. 2021.

IRENA. *RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2021*. 2021. Disponível em: <<https://irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-2021>>. Acesso em: 01 fev. 2022.

ABSOLAR. *Energia Solar Fotovoltaica no Brasil*. 2021. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/arquivos-2/infografico-absolar-n-27-junho-2021/>>. Acesso em: 01 fev. 2022.

SOLAR, P. *Dados do mercado de energia solar no Brasil*. 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>>. Acesso em: 01 fev. 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. 2014.

MICHELS, R. N.; GNOATTO, E.; SANTOS, J. A. A. dos; KAVANAGH, E.; HALMEMAN, M. C. A influência da temperatura na eficiência de painéis fotovoltaicos em diferentes níveis de incidência de radiação solar. 2010.

RIBEIRO, I. P.; MATOS, F. F. D. S.; ALEXANDRIA, A. R. Avaliação computacional da influência da temperatura na potência de um painel fotovoltaico. 2016.

LIMA, D. S. Análise comparativa entre um sistema solar com rastreamento e um fixo. 2020.

NÓBREGA, B. S. da; LIMA, W. G.; MELO, R. H. F. de; AGUIAR, E. C.; PEREIRA, R. C.; OLIVEIRA, I. de S. Comparação entre sistemas fotovoltaicos em modo fixo e com seguidor em uma instituição pública de ensino no nordeste do Brasil. 2019.

MACIEL, D. R.; SOUZA, T. M.; BOULOMYTIS, V. T. G. Ensaios laboratoriais para a comparação entre a irradiação solar captada por painéis fotovoltaicos fixos e móveis. 2021.

FREITAS, G. de A. Eficiência energética de um painel fotovoltaico com rastreador solar baseado em sensores LDR comparado a um painel em ângulo fixo. 2018.

UNICAMP. *Órbitas dos astros*. 2020. Disponível em: <[PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L. de; RUTHER, R.; ABREU, S. L. de; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. de. Atlas brasileiro de energia solar. v. 2, 2017.](http://www.ime.unicamp.br/~apmat/leis-de-kepler-e-as-elipses/#:~:text=Em%20sua%20teoria%2C%20Cop%C3%A9rnico%3A,e%20o%20planeta%20an%C3%A3o%20Plut%C3%A3o).> Acesso em: 08 mar. 2022.</p></div><div data-bbox=)

GHENSEV, A. Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas. 2006.

SOLARTHON. *Como Funciona um Sistema de Energia Solar?* 2022. Disponível em: <[STONE, J. L. *Photovoltaics: Unlimited Electrical Energy From the Sun*. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.881362>>. Acesso em: 11 abril 2022.](https://solarthron.com.br/como-funciona-um-sistema-de-energia-solar/#:~:text=Efeito%20fotovoltaico,-A%20tecnologia%20que&text=Resumidamente%2C%20os%20raios%20de%20sol,criando%20assim%20uma%20corrente%20el%C3%A9trica.> Acesso em: 11 abril 2022.</p></div><div data-bbox=)

JÚNIOR, J. M. D. A. W. Proposta de controlador de carga com MPPT utilizando LabVIEW. 2015.

- PERUZZO, E. S.; JUNIOR, G. P. Como é realizado o mppt. 2021.
- ORTIZ, F. H. V.; ALVES, V. C. G.; HOLDEFER, A. E.; MEDEIROS, A. M. M. Desenvolvimento de sistema automático de rastreamento solar para painéis fotovoltaicos. 2018.
- MORALES, D. S. Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic applications. 2010.
- SOARES, R. A. Logística reversa dos módulos solares fotovoltaicos de silício cristalino no Brasil. 2017. trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia de energias renováveis). universidade federal do Ceará. 2017.
- PRADO, P. F. de A. Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais. 2018. dissertação (mestrado em ciências). escola politécnica. universidade de São Paulo. 2018.
- SCOLLA, M. Avaliação do ciclo de vida de sistemas de geração de energia fotovoltaica: uma análise sob a ótica de fatores ambientais. 2020. trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia elétrica). universidade regional do noroeste do estado do Rio Grande do Sul, 2020.
- EPE. *Relatório síntese 2021 - Ano base 2020*. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.
- AMBSCIENCE, E. *Energia Renovável*. 2022. Disponível em: <<https://ambscience.com/energia-renovavel/>>. Acesso em: 31 jan. 2022.
- SOLAR, P. *Vantagens e desvantagens do rastreador solar*. 2020. Disponível em: <<https://www.ecoenergias.com.br/2020/07/21/tracker-rastreador-solar-vantagens-desvantagens/>>. Acesso em: 03 fev. 2022.
- BOMUBO-PEPPLE, V.; C, I.-C.; I, A. G. Effects of temperature, solar flux and relative humidity on the efficient conversion of solar energy to electricity”. *European Journal of Scientific Research*, vol.35(2), pp. 173-180, 2009. 2009.
- KAWAMURA, T.; K., H.; Y., I.; T., T.; T., N. H. O.; M., I. “analysis of mppt characteristics in photovoltaic power system”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol.47, pp. 155-165, 1997. 1997.
- CHEGAAR, M.; HAMZAOU, A.; NAMODA, A.; PETIT, P.; AILLERIE, M.; HERGUTH., A. Effect of illumination intensity on solar cells parameters. *Energy Procedia*, v. 36, p. 722–729, 2013.
- RHIF, A. A position control review for a photovoltaic system: dual axis sun tracker. *Technical Review*, v. 28, n. 6, p. 479–485, 2011.
- SOUZA, A. de; ARISTONE, F. Um estudo da temperatura e da irradiação solar em células fotovoltaicas. 2017.
- SHAYANI, R. A. Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células. dissertação (mestrado em engenharia elétrica)–departamento de engenharia). 2006.
- TOLMASQUIM, M. T. Energia renovável: Hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: Empresa de pesquisa energética (epe). 2016.
- HELERBROCK, R. *Características e estrutura física do Sol*. 2019. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/fisica/sol.htm>>. Acesso em: 14 mar. 2022.
- IBERDROLA, . *Radiação Solar*. 2022. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/compromisso-social/radiacao-solar#:~:text=O%20QUE%20%C3%89%20A%20RADIO%20%C3%87%20%C3%83O,dos%20processos%20atmosf%C3%A9ricos%20e%20climaticos%20B3gicos.>> Acesso em: 14 mar. 2022.

SOLAR o G. B. Programa Brasília solar. 2016.

HECK, C. Conversão de energia solar em energia elétrica. 2015.

FILHO, L. R. A. G. Análise e modelagem geométrica da potência gerada por um sistema híbrido solar fotovoltaico eólico. 2007.

CASTRO, R. M. G. Energias renováveis e produção descentralizada. 2007.

FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. Energia solar - fundamentos e tecnologias de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica. 1995.

ANICETO, J. M. A. Conversor dc-dc com busca de ponto de potência máxima (mppt) para painéis solares. 2010.

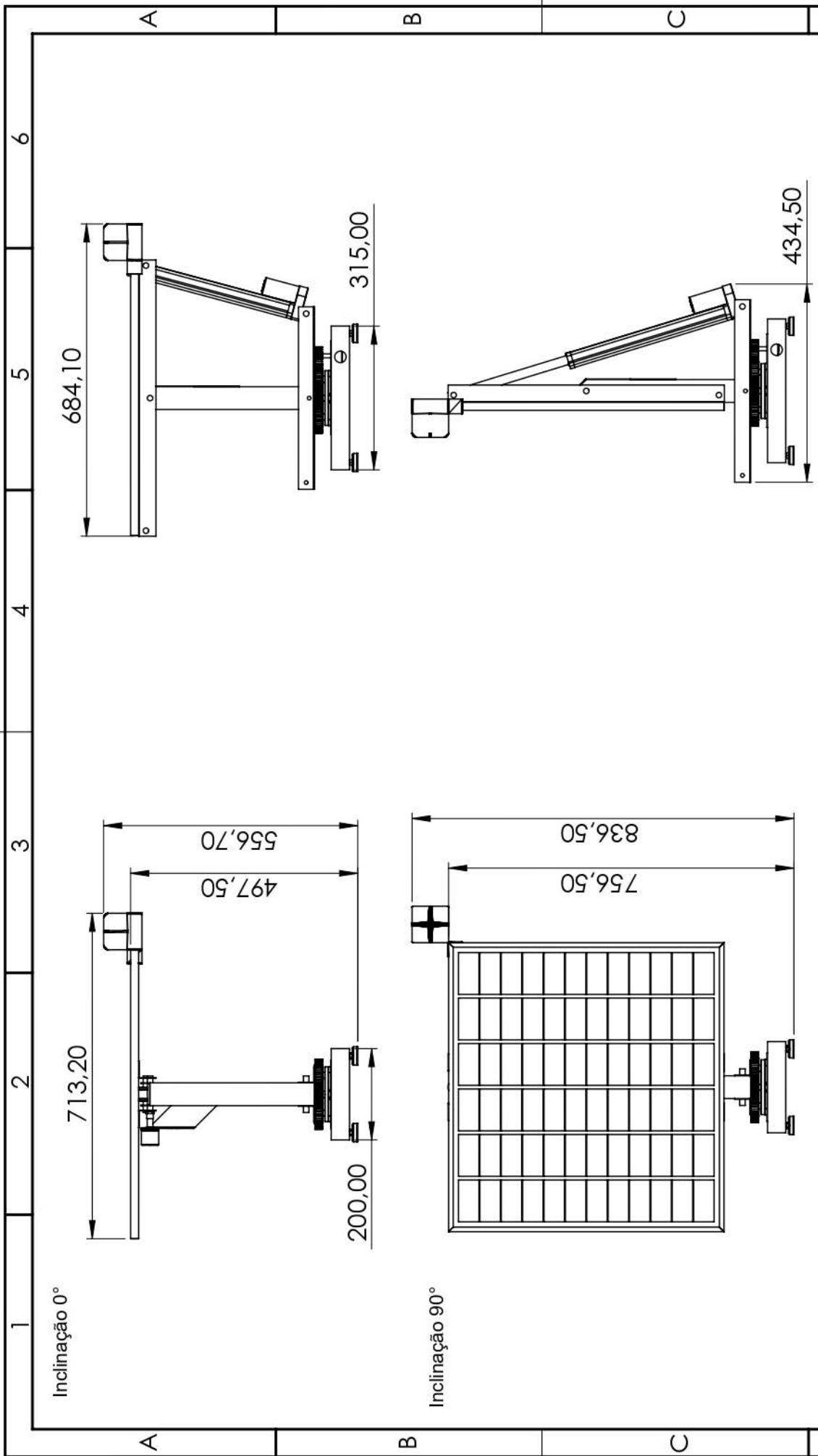
NEOSOLAR. O que são mppt e mlpe no inversor solar. 2020.


FARICELLI, C. Seguidor solar para sistema fotovoltaicos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

ANTONI, S. A.; PEREIRA, H. A. Análise de um seguidor solar unidirecional em um dia parcialmente nublado. Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014.

APÊNDICES

1		2		3		4		5		6																																			
A		B		C		D		A		B																																			
Nº DO ITEM		DESCRIÇÃO								QTD.																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																		
1	1	1	2	2	1	2	1	4	1	1	3																																		
13	14	15	16	17	18	19	20	21																																					
1	1	2	1	1	1	1	2	1																																					
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia</td> <td colspan="2">Data: 29/04/2022</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Descrição: Projeto Rastreador Solar</td> <td colspan="2">Criado por: Jaqueline Godoi</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Material: Montagem</td> <td colspan="2">Escala: 1:1</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Tratamento Superficial: Não se aplica</td> <td colspan="2">Formato: A4</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Peso: 13004.16 gramas</td> <td colspan="2">Folha: 1 de 2</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Dimensões (mm)</td> <td>0,5 a 30</td> <td>30 a 200</td> <td>200 a 500</td> <td>500 a 1000</td> </tr> <tr> <td>Tolerância (mm)</td> <td>+/- 0,1</td> <td>+/- 0,2</td> <td>+/- 0,3</td> <td>+/- 0,5</td> </tr> </table>												Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia		Data: 29/04/2022		Descrição: Projeto Rastreador Solar		Criado por: Jaqueline Godoi		Material: Montagem		Escala: 1:1		Tratamento Superficial: Não se aplica		Formato: A4		Peso: 13004.16 gramas		Folha: 1 de 2		Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas				Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000	Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5
Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia		Data: 29/04/2022																																											
Descrição: Projeto Rastreador Solar		Criado por: Jaqueline Godoi																																											
Material: Montagem		Escala: 1:1																																											
Tratamento Superficial: Não se aplica		Formato: A4																																											
Peso: 13004.16 gramas		Folha: 1 de 2																																											
Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas																																													
Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500	500 a 1000																																									
Tolerância (mm)	+/- 0,1	+/- 0,2	+/- 0,3	+/- 0,5																																									
1		2		3		4		5		6																																			
A		B		C		D		A		B																																			



		Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia	
Descrição: Projeto Rastreador Solar		Data: 29/04/2022	
Material: Montagem		Criado por: Jaqueline Godoi	
Tratamento Superficial: Não se aplica		Escala: 1:12	
Peso: 13004.16 gramas		Formato: A4	
Tabela geral para dimensões cujas tolerâncias não foram especificadas		Folha: 2 de 2	
Dimensões (mm)	0,5 a 30	30 a 200	200 a 500
Tolerância (mm)	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$
1	2	3	4
5	6	7	8

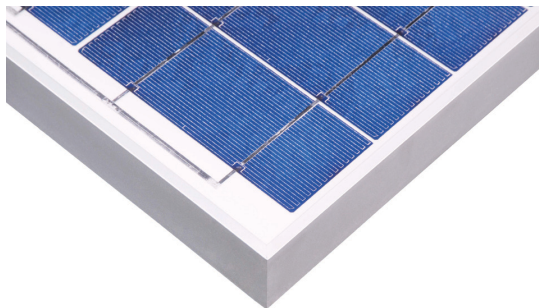
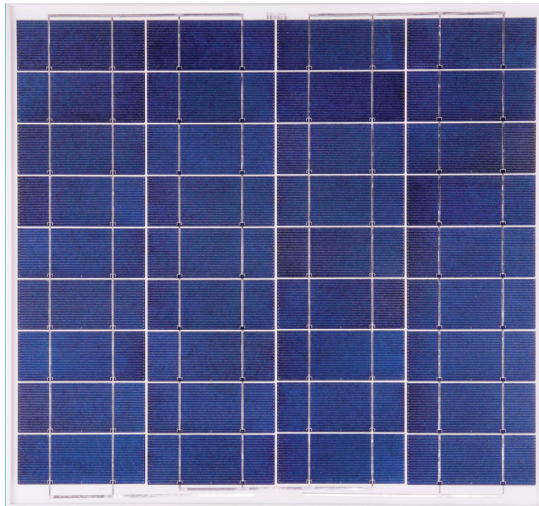


YGE 55 SERIES

Powered by **YINGLI**

YL055P-17b 2/5

YL050P-17b 2/5



ABOUT YINGLI GREEN ENERGY

Yingli Green Energy Holding Company Limited (NYSE: YGE) is one of the world's largest fully vertically integrated PV manufacturers. With over 4.5 GW of modules installed globally, we are a leading solar energy company built upon proven product reliability and sustainable performance. We are the first renewable energy company and the first Chinese company to sponsor the FIFA World Cup™.

PERFORMANCE

High efficiency, polycrystalline solar cells with high transmission and textured glass delivering a module efficiency of up to 13.2%, minimizing installation costs and maximizing the kWh output of your system per unit area.

QUALITY AND RELIABILITY

- Industry leading in-house manufacturing of polysilicon, ingots, wafers, cells and modules ensures tight control of our material and production quality.
- Robust, corrosion resistant aluminum frame independently tested to withstand wind loads of 2.4 kPa and snow loads of 2.4 kPa ensuring a stable mechanical life for your modules.
- Module packaging optimized to protect product during transportation and minimize on-site waste.
- This type of module is commonly use for the small off-grid system.

QUALIFICATIONS AND CERTIFICATES

IEC 61215, IEC 61730, CGC, ISO 9001:2008



YGE 55 SERIES

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module name			YGE 55	YGE 50
Module type			YL55P-17b 2/5	YL50P-17b 2/5
Power output	P_{max}	W	55	50
Power output tolerances	ΔP_{max}	%	+/- 5	
Module efficiency	η_m	%	13.2	12.0
Voltage at P_{max}	V_{mpp}	V	17.83	17.34
Current at P_{max}	I_{mpp}	A	3.08	2.88
Open-circuit voltage	V_{oc}	V	22.07	21.46
Short-circuit current	I_{sc}	A	3.28	3.10

STC: 1000W/m² irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.
Average relative efficiency reduction of 5% at 200W/m² according to EN 60904-1.

Electrical parameters at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

Power output	P_{max}	W	44.55	40.50
Voltage at P_{max}	V_{mpp}	V	16.43	15.98
Current at P_{max}	I_{mpp}	A	2.47	2.31
Open-circuit voltage	V_{oc}	V	20.08	19.53
Short-circuit current	I_{sc}	A	2.62	2.48

NOCT: open-circuit module operation temperature at 800W/m² irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.

THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	46 +/- 2
Temperature coefficient of P_{max}	γ	%/°C	-0.45
Temperature coefficient of V_{oc}	β_{Voc}	%/°C	-0.33
Temperature coefficient of I_{sc}	α_{Isc}	%/°C	0.06

OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	50V _{DC}
Max. series fuse rating	5A
Limiting reverse current	Do not apply external voltages larger than Voc of the module
Operating temperature range	-40 to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow and wind)	2400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

CONSTRUCTION MATERIALS

Front cover (material / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Cell (quantity / material / dimensions)	36 / multicrystalline silicon / 156mm x 62.4mm
Encapsulant (material)	ethylene vinyl acetate (EVA)
Frame (material / color / anodization color)	anodized aluminum alloy / silver / clear

- Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.
- The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.
service@yinglisolar.com
Tel: 0086-312-8929802

YINGLISOLAR.COM

© Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. | DS_YL055P-17b_25_EU_EN_201302_v02.3

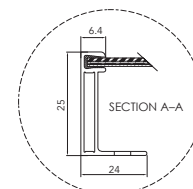
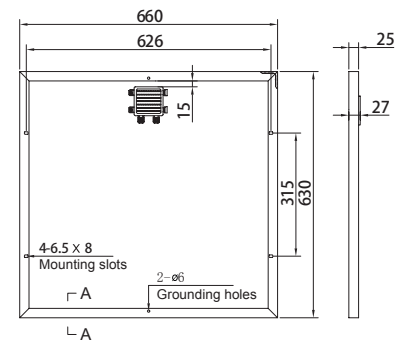
GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	660mm / 630mm / 25mm
Weight	4.79kg

PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per box	6
Packaging box dimensions (L / W / H)	690mm / 660mm / 210mm

Unit: mm



Warning: Read the Installation and User manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli Solar modules.

Our Partners:



Rotina computacional

```
1
2
3 a=70.5 %atuador aberto
4 f= 40.5 %atuador fechado
5 h= 39 %altura do perfil
6 d_placa=29.5 %posicao do atuador na placa
7 angulo_reto=90
8 angulo_y=3 %angulo em relacao a y
9 angulo_x=87 %angulo em relacao a x
10
11 %sistema em pe
12
13 b = d_placa/sind(angulo_reto)*sind(angulo_x)
14
15 c = d_placa/sind(angulo_reto)*sind(angulo_y)
16
17 distancia = sqrt((a^2)-(h+b)^2)
18
19 DFempe = distancia + c
20
21
22 %sistema deitado
23
24 x = sqrt((f)^2-(h)^2)
25
26 DFdeitado = d_placa - x
27
28 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
29
30 Diferenca = DFempe - DFdeitado
```

Código 1: Código da seção 4.1.1

Rotina computacional

```
1
2 #include <Wire.h>
3 #include <TimeLib.h>
4 #include <DS1307RTC.h>
5
6 const char *monthName[12] = {
7     "Jan", "Feb", "Mar", "Apr", "May", "Jun",
8     "Jul", "Aug", "Sep", "Oct", "Nov", "Dec"
9 };
10
11 tmElements_t tm;
12
13 void setup() {
14     bool parse=false;
15     bool config=false;
16
17     // get the date and time the compiler was run
18     if (getDate(__DATE__) && getTime(__TIME__)) {
19         parse = true;
20         // and configure the RTC with this info
21         if (RTC.write(tm)) {
22             config = true;
23         }
24     }
25
26     Serial.begin(115200);
27     while (!Serial) ; // wait for Arduino Serial Monitor
28     delay(200);
29     if (parse && config) {
30         Serial.print("DS1307 configured Time=");
31         Serial.print(__TIME__);
32         Serial.print(", Date=");
33         Serial.println(__DATE__);
34     } else if (parse) {
35         Serial.println("DS1307 Communication Error :-{");
36         Serial.println("Please check your circuitry");
37     } else {
38         Serial.print("Could not parse info from the compiler, Time=\"");
39         Serial.print(__TIME__);
40         Serial.print("\", Date=\"");
41         Serial.print(__DATE__);
42         Serial.println("\");
43     }
44 }
45
46 void loop() {
```

```

47 }
48
49 bool getTime(const char *str)
50 {
51     int Hour, Min, Sec;
52
53     if (sscanf(str, "%d:%d:%d", &Hour, &Min, &Sec) != 3) return false;
54     tm.Hour = Hour;
55     tm.Minute = Min;
56     tm.Second = Sec;
57     return true;
58 }
59
60 bool getDate(const char *str)
61 {
62     char Month[12];
63     int Day, Year;
64     uint8_t monthIndex;
65
66     if (sscanf(str, "%s %d %d", Month, &Day, &Year) != 3) return false;
67     for (monthIndex = 0; monthIndex < 12; monthIndex++) {
68         if (strcmp(Month, monthName[monthIndex]) == 0) break;
69     }
70     if (monthIndex >= 12) return false;
71     tm.Day = Day;
72     tm.Month = monthIndex + 1;
73     tm.Year = CalendarYrToTm(Year);
74     return true;
75 }

```

Código 2: Protótipo funcional 1 (André Mariano).

Rotina computacional

```
1
2 char msgByte, cmdBuff[10];
3 byte cmd_i = 0;
4
5 int16_t eeAdr;
6
7 extern const byte ldrUR,ldrUL,ldrDR,ldrDL;
8 extern volatile int posElev, posAzim;
9 extern bool printMode;
10
11 void up3(), down3(), cw3(), ccw3();
12 byte pointToSun();
13 void loadLDR();
14
15 void clearArray( char* arr, int len ){
16     for( int i = 0; i < len; i++ ){
17         arr[i] = '\0';
18     }
19 }
20
21 void cmdExe(){
22     char num[4];
23     switch( cmdBuff[0] ){
24
25     case 'h':
26         if(cmdBuff[1] == '1')
27             digitalWrite(driverIn1, HIGH);
28         if(cmdBuff[1] == '2')
29             digitalWrite(driverIn2, HIGH);
30         if(cmdBuff[1] == '3')
31             digitalWrite(driverIn3, HIGH);
32         if(cmdBuff[1] == '4')
33             digitalWrite(driverIn4, HIGH);
34         break;
35
36     case 'l':
37         if(cmdBuff[1] == '1')
38             digitalWrite(driverIn1, LOW);
39         else if(cmdBuff[1] == '2')
40             digitalWrite(driverIn2, LOW);
41         else if(cmdBuff[1] == '3')
42             digitalWrite(driverIn3, LOW);
43         else if(cmdBuff[1] == '4')
44             digitalWrite(driverIn4, LOW);
45         else if(cmdBuff[1] == 'a'){
46             digitalWrite(driverIn1, LOW);
```

```

47     digitalWrite(driverIn2, LOW);
48     digitalWrite(driverIn3, LOW);
49     digitalWrite(driverIn4, LOW);
50     }
51     else if(cmdBuff[1] == 'o' && cmdBuff[2] == 'c'){
52         pointToSun();
53     }
54     else loadLDR();
55     break;
56
57 case 'p':
58     Serial.println(pointToSun());
59     break;
60
61 case 'u':
62     up3();
63     break;
64
65 case 'd':
66     down3();
67     break;
68
69 case 'c':
70     if(cmdBuff[1] == 'w'){
71         cw3();
72     }else if(cmdBuff[1] == 'c' && cmdBuff[2] == 'w'){
73         ccw3();
74     }
75     break;
76
77 case 'v':
78     printMode = !printMode;
79     break;
80
81 default:
82     Serial.println("Command unrecognized. No action invoked.");
83     break;
84 }
85 }
86
87 void getCmd(){
88     while( Serial.available() > 0 ){
89         msgByte = Serial.read();
90         if( msgByte != '\n' ){
91             cmdBuff[cmd_i] = msgByte;
92             cmd_i++;
93         }
94         else{
95             cmdExe();
96             clearArray(cmdBuff, 10);
97             cmd_i = 0;
98         }

```

Código 2: Protótipo funcional 2 (André Mariano).

Rotina computacional

```
1
2 #include <EEPROM.h>
3
4 const extern byte ldrUR,ldrUL,ldrDR,ldrDL;
5
6 double URval, ULval, DRval, DLval;
7
8 bool hystWindowUR[HYSTWIDTH+1], hystWindowUL[HYSTWIDTH+1],
9     hystWindowDR[HYSTWIDTH+1], hystWindowDL[HYSTWIDTH+1];
10
11 bool URLit, ULLit, DRlit, DLLit;
12
13 bool printMode;
14
15 void loadLDR(){
16     int16_t adr=0;
17     double n1, n2, n3, n4;
18     while(adr < 4032){
19         EEPROM.get(adr, n1);
20         adr += sizeof(double);
21         EEPROM.get(adr, n2);
22         adr += sizeof(double);
23         EEPROM.get(adr, n3);
24         adr += sizeof(double);
25         EEPROM.get(adr, n4);
26         adr += sizeof(double);
27
28         Serial.print(n1);
29         Serial.print(',');
30         Serial.print(n2);
31         Serial.print(',');
32         Serial.print(n3);
33         Serial.print(',');
34         Serial.println(n4);
35     }
36 }
37
38 void saveLDR(){
39     if(eeAdr <= 4000){
40         EEPROM.put(eeAdr, URval);
41         eeAdr += sizeof(double);
42         EEPROM.put(eeAdr, ULval);
43         eeAdr += sizeof(double);
44         EEPROM.put(eeAdr, DRval);
45         eeAdr += sizeof(double);
46         EEPROM.put(eeAdr, DLval);
```

```

47     eeAdr += sizeof(double);
48 }
49 }
50
51 bool binThresh(double v){
52     return v>LDRTHRESHOLD;
53 }
54
55 void printLDR(){
56     if(printMode){
57         Serial.print(URlit);
58         Serial.print(", ");
59         Serial.print(ULlit);
60         Serial.print(", ");
61         Serial.print(DRlit);
62         Serial.print(", ");
63         Serial.println(DLlit);
64     }
65     else{
66         Serial.print(URval);
67         Serial.print(", ");
68         Serial.print(ULval);
69         Serial.print(", ");
70         Serial.print(DRval);
71         Serial.print(", ");
72         Serial.println(DLval);
73     }
74 }
75
76 void hysteresis(){
77     bool winSwitch = true;
78     for(int i=HYSTWIDTH-1; i>0; i--){ // Add new val at beginning of window
79         hystWindowUR[i] = hystWindowUR[i-1];
80     }
81     hystWindowUR[0] = binThresh(URval);
82
83     for(int i=0; i<HYSTWIDTH; i++){ // If a single value is == old, don't switch
84         if(hystWindowUR[i] == URlit)
85             winSwitch = false;
86     }
87
88     if(winSwitch)
89         URlit = !URlit;
90
91     winSwitch = true;
92     for(int i=HYSTWIDTH-1; i>0; i--){ // Add new val at beginning of window
93         hystWindowUL[i] = hystWindowUL[i-1];
94     }
95     hystWindowUL[0] = binThresh(ULval);
96
97     for(int i=0; i<HYSTWIDTH; i++){ // If a single value is == old, don't switch
98         if(hystWindowUL[i] == ULlit)

```

```

99     winSwitch = false;
100 }
101
102 if(winSwitch)
103     ULlit = !ULlit;
104
105 winSwitch = true;
106 for(int i=HYSTWIDTH-1; i>0; i--){ // Add new val at beginning of window
107     hystWindowDR[i] = hystWindowDR[i-1];
108 }
109 hystWindowDR[0] = binThresh(DRval);
110
111 for(int i=0; i<HYSTWIDTH; i++){ // If a single value is == old, don't switch
112     if(hystWindowDR[i] == DRlit)
113         winSwitch = false;
114 }
115
116 if(winSwitch)
117     DRlit = !DRlit;
118
119 winSwitch = true;
120 for(int i=HYSTWIDTH-1; i>0; i--){ // Add new val at beginning of window
121     hystWindowDL[i] = hystWindowDL[i-1];
122 }
123 hystWindowDL[0] = binThresh(DLval);
124
125 for(int i=0; i<HYSTWIDTH; i++){ // If a single value is == old, don't switch
126     if(hystWindowDL[i] == DLlit)
127         winSwitch = false;
128 }
129
130 if(winSwitch)
131     DLlit = !DLlit;
132 }
133
134 void readLDR(){
135     URval = analogRead(ldrUR)*0.004883;
136     ULval = analogRead(ldrUL)*0.004883;
137     DRval = analogRead(ldrDR)*0.004883;
138     DLval = analogRead(ldrDL)*0.004883;
139
140     hysteresis();
141 }
142
143 byte pointToSun(){
144     Serial.println("Searching...");
145
146     readLDR();
147     if(URlit || DRlit)
148         analogWrite(driverIn2, 255);
149     else
150         analogWrite(driverIn1, 255);

```



```

151 while(true){
152     readLDR();
153     if((URLit && ULLit) || (DRLit && DLLit)){
154         digitalWrite(driverIn1, LOW);
155         digitalWrite(driverIn2, LOW);
156         break;
157     }
158     if(!digitalRead(rotEncSw))
159         return -1;
160 }
161
162 Serial.println("Azim found");
163 printLDR();
164 delay(2000);
165
166 readLDR();
167 if(URLit || ULLit)
168     analogWrite(driverIn3, 127);
169 else
170     analogWrite(driverIn4, 127);
171 while(true){
172     readLDR();
173     if((URLit && DRLit) && (ULLit && DLLit)){
174         digitalWrite(driverIn3, LOW);
175         digitalWrite(driverIn4, LOW);
176         break;
177     }
178     if(!digitalRead(rotEncSw))
179         return -1;
180 }
181
182 Serial.println("Elev found");
183 printLDR();
184 delay(2000);
185
186 readLDR();
187 printLDR();
188 if(URLit && ULLit && DRLit && DLLit)
189     return 1;
190 else
191     return 0;
192 }
193
194 void ldrInit(){
195     URLit = binThresh(analogRead(ldrUR)*0.004883);
196     ULLit = binThresh(analogRead(ldrUL)*0.004883);
197     DRLit = binThresh(analogRead(ldrDR)*0.004883);
198     DLLit = binThresh(analogRead(ldrDL)*0.004883);
199     for(int i=0; i<HYSTWIDTH; i++){
200         // here we fill in the hysteresis filter's window of values
201         hystWindowUR[i] = URLit;
202         hystWindowUL[i] = ULLit;

```

```
203     hystWindowDR[i] = DRlit;  
204     hystWindowDL[i] = DLlit;  
205 }
```

Código 2: Protótipo funcional 3 (André Mariano).

Rotina computacional

```
1
2 extern const byte driverIn1;
3 extern const byte driverIn2;
4 extern const byte driverIn3;
5 extern const byte driverIn4;
6
7 const byte pots[] =
      {127,133,146,165,190,215,235,248,255,255,255,255,255,248,235,215,190,165,146,133,127};
8 byte iPotsElev = 0, iPotsAzim = 0;
9
10 bool posElevChanged = false, posAzimChanged = false;
11 bool movingElev = false, movingAzim = false;
12
13 unsigned long lastAzimMoveTime, lastElevMoveTime;
14
15 bool up, cw;
16
17 void up3(){
18     if(movingElev == false){
19         movingElev = true;
20         up = true;
21     }
22 }
23
24 void down3(){
25     if(movingElev == false){
26         movingElev = true;
27         up = false;
28     }
29 }
30
31 void cw3(){
32     if(movingAzim == false){
33         movingAzim = true;
34         cw = true;
35     }
36 }
37
38 void ccw3(){
39     if(movingAzim == false){
40         movingAzim = true;
41         cw = false;
42     }
43 }
44
```

```

45 void actOnElev(){
46   if(movingElev && iPotsElev == 0){
47     if(up)  analogWrite(driverIn1, pots[iPotsElev]);
48     else    analogWrite(driverIn2, pots[iPotsElev]);
49     lastElevMoveTime = millis();
50     iPotsElev++;
51   }
52
53   if(movingElev && posElevChanged){
54     if(up)  analogWrite(driverIn1, pots[iPotsElev]);
55     else    analogWrite(driverIn2, pots[iPotsElev]);
56     lastElevMoveTime = millis();
57     iPotsElev++;
58     posElevChanged = false;
59   }
60
61   if(iPotsElev == 21){
62     iPotsElev = 0;
63     movingElev = false;
64     digitalWrite(driverIn1, LOW);
65     digitalWrite(driverIn2, LOW);
66   }
67
68   if(movingElev && (millis() - lastElevMoveTime > ELEVTIMEOUTMS)){
69     iPotsElev = 0;
70     movingElev = false;
71     digitalWrite(driverIn1, LOW);
72     digitalWrite(driverIn2, LOW);
73   }
74 }
75
76 void actOnAzim(){
77   if(movingAzim && iPotsAzim == 0){
78     if(cw)  analogWrite(driverIn4, pots[iPotsAzim]);
79     else    analogWrite(driverIn3, pots[iPotsAzim]);
80     lastAzimMoveTime = millis();
81     iPotsAzim++;
82   }
83
84   if(movingAzim && posAzimChanged){
85     if(cw)  analogWrite(driverIn4, pots[iPotsAzim]);
86     else    analogWrite(driverIn3, pots[iPotsAzim]);
87     lastAzimMoveTime = millis();
88     iPotsAzim++;
89     posAzimChanged = false;
90   }
91
92   if(iPotsAzim == 21){
93     iPotsAzim= 0;
94     movingAzim = false;
95     digitalWrite(driverIn4, LOW);
96     digitalWrite(driverIn3, LOW);

```

```
97  }
98
99  if(movingAzim && (millis() - lastAzimMoveTime > AZIMTIMEOUTMS)){
100    iPotsAzim= 0;
101    movingAzim = false;
102    digitalWrite(driverIn4, LOW);
103    digitalWrite(driverIn3, LOW);
104  }
105 }
```

Código 2: Protótipo funcional 4 (André Mariano).

Rotina computacional

```
1
2 const byte driverIn1 = 3;
3 const byte driverIn2 = 5;
4 const byte driverIn3 = 9;
5 const byte driverIn4 = 10;
6
7 const byte encAzimD1 = 49;
8 const byte encAzimD2 = 47;
9 const byte encElevD1 = 51;
10 const byte encElevD2 = 53;
11
12 const byte ldrUR = A0;
13 const byte ldrUL = A1;
14 const byte ldrDR = A3;
15 const byte ldrDL = A2;
16
17 const byte rotEncCk = 22;
18 const byte rotEncDT = 24;
19 const byte rotEncSw = 26;
```

Código 2: Protótipo funcional 5 (André Mariano).

Rotina computacional

```
1
2 #define ELEVTIMEOUTMS 1000
3 #define AZIMTIMEOUTMS 2500
4 #define LDRTHRESHOLD 4.92
5 #define HYSTWIDTH 4
6
7 #include <Encoder.h>
8 #include <DS1307RTC.h>
9
10 #include "pins.h"
11 #include "interface.h"
12 #include "motion.h"
13 #include "ldrutils.h"
14 #include "tracking.h"
15
16 volatile int16_t posElev, posAzim;
17
18 Encoder encElev(encElevD1, encElevD2);
19 Encoder encAzim(encAzimD1, encAzimD2);
20
21 bool pressed, axisElev, saved, finished;
22 unsigned long timePressed;
23
24 uint8_t machineState;
25
26 void setup() {
27   Serial.begin(115200);
28   delay(150);
29
30   TCCR1A = 0;
31   TCCR1B = 0;
32   TCCR1B |= (1 << CS12) | (1 << WGM12);
33   TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
34
35   ldrInit();
36   trackInit(RTC);
37   if(!tm.Hour && !tm.Minute && !tm.Second){
38     Serial.println("RTC failed!");
39     while(true){}
40   }
41
42   pinMode(driverIn1, OUTPUT);
43   pinMode(driverIn2, OUTPUT);
44   pinMode(driverIn3, OUTPUT);
45   pinMode(driverIn4, OUTPUT);
46
```

```

47  pinMode(encElevD1, INPUT_PULLUP);
48  pinMode(encElevD2, INPUT_PULLUP);
49  pinMode(encAzimD1, INPUT_PULLUP);
50  pinMode(encAzimD2, INPUT_PULLUP);
51
52  pinMode(ldrUR, INPUT);
53  pinMode(ldrUL, INPUT);
54  pinMode(ldrDR, INPUT);
55  pinMode(ldrDL, INPUT);
56
57  machineState = 0; // Not necessary but good for explicitness
58 }
59
60 // Use the timer interrupt to periodically read encoder information
61 ISR(TIMER1_COMPA_vect){
62  int16_t _newPosElev, _newPosAzim;
63
64  _newPosElev = encElev.read();
65  if(_newPosElev != posElev){
66    posElev = _newPosElev;
67    posElevChanged = true;
68  }
69
70  _newPosAzim = encAzim.read();
71  if(_newPosAzim != posAzim){
72    posAzim = _newPosAzim;
73    posAzimChanged = true;
74  }
75 }
76
77 void loop() {
78  getCmd();
79  switch(machineState){
80    case 0:
81      if(!digitalRead(rotEncCk)){
82        // the CLK pin goes low with
83        // every click of the rotary encoder
84        // then the DT pin tells the direction
85        if(axisElev){
86          if(digitalRead(rotEncDT)) up3();
87          else down3();
88          delay(250); // for debouncing
89        }else{
90          if(digitalRead(rotEncDT)) cw3();
91          else ccw3();
92          delay(250);
93        }
94      }
95
96      if(!digitalRead(rotEncSw) && !pressed){
97        axisElev = !axisElev;
98        pressed = true;

```



```

99     timePressed = millis();
100 }else if(digitalRead(rotEncSw) && pressed){
101     pressed = false;
102     delay(250);
103 }
104
105 if(pressed && millis()-timePressed>1000){
106     machineState = 1;
107     Serial.println("Tracking begin");
108 }
109 break;
110
111 case 1:
112     RTC.read(tm);
113     curTime = tm.Hour + tm.Minute/60.0 + tm.Second/3600.0;
114
115     if(trackElevs[trackElevIndex]){
116         // both tracking lists end with a 0.0
117         if(curTime > abs(trackElevs[trackElevIndex])){
118             if(trackElevs[trackElevIndex] > 0) up3();
119             else down3();
120             trackElevIndex++;
121         }
122     }
123
124     if(trackAzims[trackAzimIndex]){
125         // both tracking lists end with a 0.0
126         if(curTime > abs(trackAzims[trackAzimIndex])){
127             if(trackAzimIndex){
128                 // we have to ignore the zeroth element in the azim tracking list
129                 // because it merely represents the time the sun shows up
130                 // in the horizon and not the first time to actually move
131                 if(trackAzims[trackAzimIndex] > 0) cw3();
132                 else ccw3();
133             }
134             trackAzimIndex++;
135         }
136     }
137
138     if(tm.Second == 0 && !saved){
139         readLDR();
140         saveLDR();
141         saved = true;
142         Serial.println("Saved!");
143     }
144     if(tm.Second == 1){
145         saved = false;
146     }
147     break;
148 }
149
150 if(trackElevs[trackElevIndex] == 0.0 && trackAzims[trackAzimIndex] == 0.0){

```

```
151
152     if(!finished){
153         Serial.println("Reached end of trajectory!");
154         finished = true;
155     }
156 }
157
158 actOnElev();
159 actOnAzim();
160 }
```

Código 2: Protótipo funcional 6 (André Mariano).

Rotina computacional

```
1
2 // The line below should be the definition of trackAzims[]
3 const double trackAzims[] =
4 {6.3515,-7.054,-7.6673,-8.1934,-8.6423,-9.0259,-9.3557,-9.6418,-9.8918,
5 -10.113,-10.31,-10.487,
6 -10.648,-10.795,-10.93,-11.056,-11.173,-11.284,-11.389,-11.488,-11.584,
7 -11.676,-11.765,-11.852,
8 -11.938,-12.021,-12.105,-12.187,-12.27,-12.353,-12.436,-12.521,-12.608,
9 -12.697,-12.789,-12.884,
10 -12.983,-13.087,-13.197,-13.314,-13.438,-13.572,-13.718,-13.876,-14.051,
11 -14.246,-14.463,-14.71,
12 -14.991,-15.315,-15.691,-16.13,-16.646,-17.248,-17.94,0.0};
13 const double trackElevs[] =
14     {7.1968,7.4098,7.6237,7.839,8.0554,8.2732,8.4929,8.7145,8.939,9.1662,
15 9.3976,9.6337,9.8765,10.128,
16 10.391,10.674,10.988,11.371,-13.396,-13.711,-13.993,-14.257,-14.508,
17 -14.751,-14.987,-15.219,-15.446,
18 -15.67,-15.892,-16.112,-16.33,-16.546,-16.761,-16.975,-17.188,0.0};
19 // The line above should be the definition of trackElevs[]
20
21 tmElements_t tm;
22
23 byte trackElevIndex, trackAzimIndex;
24
25 double curTime;
26
27 void trackInit(DS1307RTC RTC){
28     RTC.read(tm);
29
30     curTime = tm.Hour + tm.Minute/60.0 + tm.Second/3600.0;
31
32     while(curTime > abs(trackElevs[trackElevIndex])){
33         if(trackElevs[trackElevIndex] == 0.0)
34             break;
35         trackElevIndex++;
36     }
37
38     while(curTime > abs(trackAzims[trackAzimIndex])){
39         if(trackAzims[trackAzimIndex] == 0.0)
40             break;
41         trackAzimIndex++;
42     }
43
44     Serial.println(curTime);
45     Serial.println(trackElevs[trackElevIndex]);
```

```
46 Serial.println(trackAzims[trackAzimIndex]);  
47 }
```

Código 2: Protótipo funcional 7 (André Mariano).

Rotina computacional

```
1
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import numpy as np
4
5 alldata = np.genfromtxt("../dados/dados.txt", delimiter=',', dtype=np.float64)
6 datalen, datawid = alldata.shape
7
8 x = np.arange(datalen, dtype=np.float64)
9
10 data1 = []
11 data2 = []
12 data3 = []
13 data4 = []
14
15 for tup in alldata:
16     data1.append(tup[0])
17     data2.append(tup[1])
18     data3.append(tup[2])
19     data4.append(tup[3])
20
21 data1 = np.array(data1, dtype=np.float64)
22 data2 = np.array(data2, dtype=np.float64)
23 data3 = np.array(data3, dtype=np.float64)
24
25 fig, axes1 = plt.subplots()
26
27 line1, = axes1.plot(x, data1, label="LDR esq cima")
28 line2, = axes1.plot(x, data2, label="LDR dir cima")
29 line3, = axes1.plot(x, data3, label="LDR esq baixo")
30 line4, = axes1.plot(x, data4, label="LDR dir baixo")
31
32 axes1.set_xlabel("Tempo (min)")
33 axes1.set_ylabel("Leitura LDR")
34 axes1.set_title("Rastreamento solar 30/08 - Teste 1")
35 axes1.set_ylim(bottom=4, top=5.5)
36 axes1.set_xlim(left=0, right=datalen)
37
38 axes1.legend(loc="lower center")
39
40 plt.show()
41 fig.savefig("../dados/graph.jpg")
```

Código 2: Análise dos dados e geração de trajetória (André Mariano).

Rotina computacional

```
1 from datetime import datetime
2
3 azimNums = []
4 elevNums = []
5 days = range(4,365,7)
6
7 with open("../dados/Tabela_azimute.txt",'r') as f:
8     for line in f:
9         cnums = line.split(',')
10        azimNums.append([float(num) for num in cnums])
11
12 with open("../dados/Tabela_elevacao.txt",'r') as f:
13     for line in f:
14         cnums = line.split(',')
15         elevNums.append([float(num) for num in cnums])
16
17 doy = datetime.now().timetuple().tm_yday
18 trackDoy = min(days, key=lambda x:abs(x-doy))
19 print(f"Current doy:{doy}\nDoy in list:{trackDoy}")
20 trackAzims = azimNums[days.index(trackDoy)]
21 trackElevs = elevNums[days.index(trackDoy)]
22 with open("../dados/raw.txt",'w') as f:
23     f.write("const double trackAzims[] = {")
24     for num in trackAzims:
25         f.write(str(num))
26         if(num):
27             f.write(',')
28         else:
29             f.write(');\n')
30         break
31
32     f.write("const double trackElevs[] = {")
33     for num in trackElevs:
34         f.write(str(num))
35         if(num):
36             f.write(',')
37         else:
38             f.write(');\n')
39         break
```

Código 2: Análise de dados e geração de trajetória 2 (André Mariano).

ANEXO - IMPORTÂNCIA DA RECICLAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A energia solar fotovoltaica é considerada como uma energia limpa, durante sua operação não há emissão de gases poluentes nem de ruídos, por isso ela apresenta um grande potencial de crescimento para o futuro energético e para o desenvolvimento sustentável.(SCOLLA, 2020)

Logo, à medida que a capacidade fotovoltaica aumenta, também aumentará o volume de módulos em fim de vida. Estimativas com base em uma suposição de vida de 30 anos com cenários de perda antecipada, encontra-se um cumulativo de módulos fotovoltaicos em fim de vida que pode totalizar 1 milhão de toneladas nos Estados Unidos até 2030 e até 10 milhões em 2050. (??)

O descarte incorreto dos módulos fotovoltaicos ao meio ambiente pode causar problemas para os corpos d'água, além de ocasionar a toxidade do meio gerando a morte da fauna e da flora. Além disso, os componentes dos painéis dispõem de um valor econômico agregado, principalmente quando se fala dos metais. Como é de amplo conhecimento o uso de sistemas fotovoltaicos está em crescimento mundial, obrigando os fabricantes a aumentarem sua produção, porém os metais presentes nos módulos não acompanham o crescimento requerido, fator que torna a recuperação desses materiais economicamente viáveis. (PRADO, 2018)

Os resíduos fotovoltaicos apresentam certa dificuldade sobre a sua disposição final, devido à variedade de materiais em sua composição. Não existe dados oficiais acerca de uma grande geração de descarte de módulos fotovoltaicos, isso porque sua vida útil dura em média 25 a 30 anos, e ela começou a ser implementada em larga escala há cerca de 35 anos, portanto é de se esperar uma grande quantidade de resíduos FV num futuro próximo. É estimado um descarte de um milhão de toneladas de módulos fotovoltaicos em 2035. (??)

Para determinar os impactos causados pelos módulos FV, é preciso analisá-los durante todos os seus processos desde a extração da matéria-prima da natureza até o fim da sua vida útil, onde os resíduos podem ser reciclados, reutilizados, participar da logística reversa ou serem descartados. (SCOLLA, 2020)

A reciclagem de módulos fotovoltaicos pode recuperar materiais de alto valor (por exemplo, silício, índio, prata, telúrio e cobre) para uso na fabricação nacional ou para venda no mercado de commodities. Uma recuperação nacional autossuficiente desses recursos pode reduzir a dependência de importações estrangeiras e aliviar as restrições de recursos. Além disso, a recuperação desses materiais também pode reduzir resíduos, os impactos ambientais e a energia total necessária para minerar, transportar e refinar materiais virgens e fabricar novos módulos fotovoltaicos. (??)

Os fabricantes podem reduzir seus custos reciclando e reutilizando os materiais recuperados dos módulos fotovoltaicos. Fabricantes, proprietários de sistemas, recicladores terceirizados e

outros também podem gerar receita por venda de materiais recuperados em mercados de commodities. Além disso, os proprietários do sistema e os fabricantes também podem achar vantajoso reciclar módulos fotovoltaicos para cumprir com padrões da indústria para melhorar a imagem de sua empresa e aumentar sua competitividade geral no mercado. (??)

No Brasil, ainda não existe legislação específica sobre a reciclagem de módulos fotovoltaicos no Brasil. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Leinº 12.305/10) sugeriu o uso da logística reversa de REEE e definiram objetivos e metas a fim de evitar à destinação incorreta desses resíduos aos aterros de lixo convencional, com o intuito de acabar com essa modalidade de rota. (PRADO, 2018)

São do conhecimento que apesar de ser uma fonte de energia renovável, os sistemas fotovoltaicos podem causar impactos ambientais durante sua produção, implantação e fim de operação (SOARES, 2017). Ele não emite poluente durante sua operação, porém existem alguns impactos ambientais causados por ele, pode-se citar: emissão de poluentes nos processos de fabricação, transporte e manutenção desses sistemas, emissão de produtos tóxicos durante o processo de matéria-prima focada na produção dos módulos e de seus componentes periféricos, perda de habitat, impactos visuais, além dos riscos associados aos materiais tóxicos que são utilizados como gálio e cádmio. Durante o processo produtivo das células solares fotovoltaicas de silício cristalino há a emissão de gases como CO₂, SO₂ e NO_x, dessa forma através da reciclagem é possível reduzir a emissão de tais gases já que serão aproveitadas as células de outros módulos, diminuindo sua necessidade produtiva (SOARES, 2017). Na Figura 1 são apresentadas algumas etapas do processo produtivo dos módulos de silício policristalino, bem como suas respectivas emissões.

Etapa do Processo/Material	Rejeitos	
Minação e Refino	Cinza respirável	X-Silica
Redução de SiO ₂ para Silício Etapa do processo/material	CO ₂ SiO ₂	H ₂ O SO ₂
Produção de Silício de Alta Pureza	Pó de Si SiO ₂ CaCl ₂ NaCl	F contendo cinza Cl contendo cinza CO ₂
Moldagem/Corte/Bolacha	Si contaminado Si (perdas contaminadas) Gás Argônio Óleo Mineral	Si (em óleo mineral) SiC Fluidos de Limpeza
Serigrafia/Texturização	Na ₂ SO ₄ KCl	NaNO ₃
Formação do Emissor	NaHPO ₃ NaOCl NaF	CaF ₂ CO ₂
Metalização	Solventes evaporados	CO ₂ H ₂ O
Passivação/ARC	N ₂ Isopropanol Água (g)	TiOx (na água) TiOx (s)
Produção do Módulo	Células rejeitadas Perdas de cortes de EVA Módulos rejeitados	Adesivo Silício Produtos de Reticulação
Moldura	Elastrômero de Polissulfureto	

Figura 1: Emissões durante a produção de módulos fotovoltaicos de silício policristalino. (SOARES, 2017)

Para realizar a reciclagem dos módulos fotovoltaicos existem várias opções, um dos métodos seria um processo térmico para separação dos seus componentes, uso de laser ou tratamento químico para a purificação da célula para retirar a camada antirreflexo e as junções metálicas, que

geralmente são de cobre ou prata, e apresentam um grande valor econômico. A lixiviação e a pirólise são alguns exemplos de tratamento químicos realizados para a remoção dos componentes que não fazem parte da célula, sua escolha depende das próximas etapas de recuperação. Após o silício ser separado, ele pode ser reaproveitado em um novo módulo fotovoltaico, reduzindo as emissões de CO₂. Quanto ao alumínio, polímeros e o vidro, materiais de interesse financeiro, podem ser levados à reciclagem após suas respectivas separações, para que ocorra um aproveitamento deles sem a imposição da extração de seus recursos primários. (??)

A recuperação dos módulos fotovoltaicos é vantajosa também do ponto de vista ambiental, no referente ao consumo de água, energia e materiais, além disso, as emissões dos gases do efeito estufa são reduzidas. Alguns dos componentes dos módulos como a prata, o silício e o antimônio (presente no vidro) apresentam um grande potencial econômico ainda inexplorado. O estimado é que em entre 2030 e 2050 a prata, o cobre e o alumínio irão corresponder de U\$0,54/W a U\$1,70/W do custo total dos módulos de silício cristalino, se tornando os principais atrativos da reciclagem dos módulos. (PRADO, 2018) Na Figura 2 é possível notar quais os materiais recuperados, seu valor financeiro, sua massa por potência e os tipos de módulos fotovoltaicos em que se encontram.

Materiais recuperados	Preço [US\$/kg]	Massa por potência [kg/MW] (c-Si)	Massa por potência [kg/MW] (a-Si)	Tipos de módulos
Alumínio (Al)	1,89	10700	100	c-Si
Cobre (Cu)	6,00	583	-	c-Si
Silício 9N (Si)	14,27	3069	18	c-Si / a-Si
Prata (Ag)	530	5,115	-	c-Si
Índio (In)	540	300	900	a-Si, CIS, CIGS
Gálio (Ga)	300	-	-	CIGS
Germânio (Ge)	1760	-	Somado ao In	a-Si

Figura 2: Elementos metálicos e semimetálicos que podem ser recuperados de módulos fotovoltaicos. (PRADO, 2018)

A Figura 3 apresenta algumas formas de reciclagem dos painéis, com suas vantagens e desvantagens.

Tecnologia / Processo	Vantagens	Desvantagens
Dissolução em solvente orgânico	Fácil remoção do EVA Menor dano às células FV Recuperação do vidro	Impacto devido às emissões e resíduos ao meio
Solvente orgânico e irradiação ultrassônica	Fácil remoção do EVA Mais eficiente que a dissolução	Impacto devido às emissões e resíduos do meio Custos dos equipamentos
Calor / Eletrotérmico	Fácil remoção do vidro	Processo lento
Separação mecânica	Menor dano Às células FV Recuperação do vidro	Requer outro processo para completa remoção do EVA Danos às células FV
Pirólise	Recuperação de materiais (80% do sanduiche e de 100% do vidro) Eficiência e custo para escala em processo industrial	Danos às células
Dissolução em solvente (Ácido nítrico)	Remoção completa do EVA e de metais dos contatos elétricos do sanduiche Possibilidade de recuperação da célula FV intacta	Causa danos às células FV Geração de emissões e resíduos prejudiciais ao meio
Desintegração física	Capacidade de tratar os resíduos	Requer outro processo para completa remoção do EVA Geração de resíduos com metais pesados Danos às células FV
Mecânico (seco e úmido)	Minimiza os impactos causados nos processos químicos Viabilidade dos equipamentos Baixo consumo de energia	Baixa recuperação de materiais raros
Tratamento térmico (calor em duas etapas)	Completa remoção do EVA Possível recuperação da célula FV intacta	Geração de emissões prejudiciais ao meio Alto consumo de energia
Solução química	Recuperação de metais com elevado grau de pureza Processo simples e eficiente	Uso de soluções químicas

Figura 3: Tecnologias de reciclagem para módulos c-Si. (SCOLLA, 2020)