

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL



William Germano de Abreu

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE GERAÇÃO SOLAR ON-GRID
UTILIZANDO SEGUIDOR SOLAR DE EIXO ÚNICO E
INSTALAÇÃO COMUM**

Cajazeiras
2021

William Germano de Abreu

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE GERAÇÃO SOLAR ON-GRID
UTILIZANDO SEGUIDOR SOLAR DE EIXO ÚNICO E
INSTALAÇÃO COMUM**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Coordenação do Curso de Tecnologia em
Automação Industrial do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
como parte dos requisitos para a obtenção do
grau de Tecnólogo em Automação Industrial

Orientador: Marco Damasceno de Sousa

Cajazeiras
2021

William Germano de Abreu

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE GERAÇÃO SOLAR ON-GRID
UTILIZANDO SEGUIDOR SOLAR DE EIXO ÚNICO E INSTALAÇÃO
COMUM**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Tecnologia em
Automação Industrial do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
como parte dos requisitos para a obtenção do
grau de Tecnólogo em Automação Industrial

BANCA EXAMINADORA

Marco D. de Sousa.

Prof. Esp. Marco Damasceno de Sousa - (Orientador)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB

Abinadabe Silva Andrade
Prof. Dr. Abinadabe Silva Andrade - (Membro)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB.

Jose Tavares de Luna Neto
Prof. Ms. Jose Tavares de Luna Neto - (Membro)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB.

Raphaell Maciel de Sousa
Prof. Dr. Raphaell Maciel de Sousa - (Membro)
Unidade Acadêmica de Indústria do IFPB.

Cajazeiras, 08 de Setembro de 2021

IFPB /Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Catalogação na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

A162a

Abreu, William Germano de

Análise comparativa entre geração solar on-grid utilizando seguidor solar de eixo único e instalação comum / William Germano de Abreu; orientador Marco Damasceno de Sousa.- 2021.

78 f. : il.

Orientador: Marco Damasceno de Sousa.

TCC (Tecnólogo em Automação Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2021.

1. Energia solar 2. Seguidores solares 3. Sistema on- grid 4. Rastreadores solares polares I. Título

CDU 621.383.51(0.067)

“A rotação da vida compõe-se de luz e sombras e nesse movimento gerador surge a translação regida pelo solstício e equinócio, cuja dinâmica interacionista oportuniza vivenciar as estações da vida, cada uma com sua singularidade e sua beleza própria.”
(Valdina Germano – As estações da vida)

DEDICATÓRIA

À minha mãe em especial, fonte de amor incondicional, apoio inabalável e incentivo, a meu pai pela dedicação, apoio e auxílio em todos os momentos de dificuldade.

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, autor da vida e criador de todo o universo, pela oportunidade de atingir esse estágio em minha trajetória; à minha mãe, alicerce do meu ser que sempre incentivou e me deu forças para continuar, e que incansavelmente fez de tudo para proporcionar condições para alcançar um futuro melhor com seus puxões de orelha me encaminhando para tal. A meu pai pela força e auxílio inquestionáveis sempre que necessário, alicerce da minha moral. Tenho que agradecer também à minha família, cujo acolhimento nunca me faltou em nenhuma ocasião, com uma menção honrosa a meu tio Francisco Soares que em muito me ajudou e instruiu em manutenções mecânicas fundamentais para que a realização desse trabalho fosse possível, e à minha tia, Valdina Germano, cujo aconselhamento e fundamentação linguística auxiliaram na conclusão do trabalho como um todo. Aos meus colegas, que estiveram juntos durante toda a jornada acadêmica e que vão muito além disso. A toda a equipe do IFPB, que acolhe a todos como uma mãe e acaba por se tornar uma segunda casa para todos nós. E por último, mas não menos importante, agradecer ao meu orientador, Professor Especialista Marco Damasceno de Sousa por todo o apoio prestado nessa parceria; sua amizade, orientação e dicas necessárias que foram a chave fundamental para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Nos últimos anos, os sistemas de geração fotovoltaica têm ganhado importante destaque na matriz elétrica brasileira. Nesses sistemas, a conversão de energia é feita por módulos instalados em estruturas fixas cuja inclinação é determinada em função da latitude do local. Apesar do constante crescimento da utilização da energia solar fotovoltaica na matriz energética nacional, ainda existe uma barreira sobre a utilização plena dos módulos solares: a baixa eficiência de conversão. Nesse sentido, como alternativa para aumentar a eficiência dos módulos, pode-se utilizar sistemas de rastreamento solar, que são mecanismos automatizados capazes de acompanhar a trajetória do sol ao longo do dia. Desta forma, este trabalho avalia o desempenho de dois módulos fotovoltaicos de mesma potência submetidos às mesmas condições climáticas, sendo um dos módulos instalado de forma convencional (estática) e o outro instalado em um rastreador solar de eixo único (dinâmica). Os módulos são conectados a um microinversor *on-grid* da marca Hoymiles, o qual injeta a potência gerada de ambas as placas na rede elétrica local. O objetivo da pesquisa é analisar o ganho líquido do rastreador solar em comparação com o sistema estático. Para isso, o rastreador solar é equipado com um wattímetro digital que contabiliza o consumo energético do sistema de controle e atuador. Para avaliação dos resultados, três dias, com condições climáticas diferentes, foram escolhidos: um dia ensolarado; um dia parcialmente nublado, ou seja, com passagens esporádicas de nuvens; e um dia totalmente nublado. O rastreador solar apresentou ganho líquido significativo para os dias ensolarados e parcialmente nublados. Porém, apresentou desempenho inferior para o dia totalmente nublado. O ganho líquido médio do rastreador solar para o período total de análise (do dia 15 de julho ao dia 04 de agosto de 2021) foi de 17,94%.

Palavras-Chave: Seguidor Solar; Energia Solar; On-grid; Rastreador Solar Polar.

ABSTRACT

In recent years, photovoltaic generation systems have gained important prominence in the Brazilian electric matrix. In these systems, the conversion of energy is done by modules that are installed in fixed structures, with slope determined according to the latitude of the site. Despite the constant growth of photovoltaic solar energy, the main barrier of solar modules is low conversion efficiency. In this sense, as an alternative to increase the efficiency of the modules, one can use solar tracking systems, which are automated mechanisms capable of monitoring the trajectory of the sun throughout the day, thus, this work evaluates the performance of two photovoltaic modules of the same power submitted to the same climatic conditions, one of the modules installed conventionally (fixed) and the other installed in a single-axis solar tracker. The modules are connected to a Hoymiles on-grid microinverter, which injects the power generated from both cards into the local power grid. The objective of the research is to analyze the net gain of the solar tracker compared to the fixed system, for this, the system is equipped with a digital wattimeter that counts the energy consumption of the control system and actuator. To evaluate the results, three days, with different climatic conditions, were chosen: a sunny day; a partly cloudy day, i.e. with sporadic passages of cloud; and a totally cloudy day. The solar tracker showed significant net gain for sunny and partly cloudy days. However, it showed lower efficiency for the totally cloudy day. The average net gain of the solar tracker for the total analysis period (from July 15 to August 4, 2021) was 17.94%.

Keywords: Solar Follower; Solar Energy; On-grid; Polar Solar Tracker.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dissipação de energia solar sobre a terra	18
Figura 2 - Mapa de irradiação solar anual mundial	19
Figura 3 – Trajetória Eclíptica Da Terra E Sua Variação Angular	20
Figura 4 – Variação da distância sol-terra durante o ano e fenômenos decorrentes	20
Figura 5 – Ângulos fundamentais gerados pela incidência solar	22
Figura 6 - Estrutura física simplificada de uma célula fotovoltaica e efeito fotovoltaico.....	25
Figura 7 – Da esquerda para a direita: (a) Célula solar fotovoltaica composto de silício policristalino; (b) Célula solar fotovoltaica composto de silício monocristalino.....	26
Figura 8 - Representação esquemática de um modulo fotovoltaico pela associação de várias células.	26
Figura 9 - Variação da tensão e corrente com a temperatura	28
Figura 10 – Esquemático de instalação de um sistema de geração Off-grid.....	30
Figura 11 – Esquemático de instalação de um sistema de geração On-grid.....	31
Figura 12 – Esquemático de instalação de um sistema de geração On-grid.....	33
Figura 13 – Esquema de funcionamento de uma estrutura de seguidor solar passiva.....	34
Figura 14 – Seguidor solar de eixo horizontal.....	35
Figura 15 - seguidor solar polar de eixo único	36
Figura 16 – Representação do comportamento de um Seguidor de Eixo Vertical durante seu curso diário.	36
Figura 17 – Representação da estrutura e funcionamento de um Seguidor de dois Eixos.....	37
Figura 18 – Estrutura de um seguidor tipo Plataforma Rotativa de dois Eixos.....	38
Figura 19 - a) Sensor utilizando barreira central para referencias de direção por sombreamento, b) Sensor angular para atenuação da sensibilidade, c) Sensor de posição utilizando colimador.	39
Figura 20 - Esquemático do projeto desenvolvido no software inventor®.....	41
Figura 21 - Montagem da estrutura para as placas.	42
Figura 22 - Dobradiça adaptada utilizada como suporte de apoio para eixo.....	43
Figura 23 – Fixação do eixo central aos pés da estrutura	44
Figura 24 – Atuador linear acoplado à estrutura.	45
Figura 25 – Estrutura posicionada e fixada na posição e orientação designadas para a coleta de dados.....	45

Figura 26 – Da direita para a esquerda respectivamente; a. Módulo Sensor IR 4 pinos; b. Módulo Sensor LDR	46
Figura 27 – Da esquerda para a direita, segue: Conjunto de LDR's com lentes colimadoras posicionados na estrutura do seguidor solar; Geometria de barreira central para referencias de direção por sombreamento.....	47
Figura 28 – Esquema de funcionamento do sensor seguidor solar.....	47
Figura 29 – a. Inversor Hoymiles MI-1200; b. DTU Hoymiles W100 Da esquerda para a direita respectivamente	51
Figura 30 – Disposição dos equipamentos na estrutura.	52
Figura 31 – Conexão é disposição dos equipamentos agrupados ao microcontrolador	53
Figura 32 - DTU e Wattímetro digital	54
Figura 33 - Esquemático de ligação do quadro de alimentação do sistema.	54
Figura 34 – Esquema de funcionamento do sensor seguidor solar.....	70

LISTA DE GRÁFICOS E TABELAS

Gráfico 1 – Gráfico comportamental de variação luminosa durante o curso diário do sol	48
Gráfico 2 – Dados coletados a partir de um dia totalmente ensolarado (19/07/2021)	56
Gráfico 3 – a. Comparativo de Geração de um dia totalmente ensolarado; b. Desempenho entre gerações. (19/07/2021)	57
Gráfico 4 – Dados coletados a partir de um dia parcialmente nublado (22/07/2021)	58
Gráfico 5 – a. Comparativo de Geração de um dia parcialmente nublado; b. Desempenho entre gerações. (22/07/2021)	59
Gráfico 6 – Dados coletados a partir de um dia totalmente nublado (01/08/2021).....	60
Gráfico 7 – a. Comparativo de Geração de um dia totalmente nublado; b. Desempenho entre gerações. (01/08/2021)	61
Gráfico 8 - Comparativo de Geração durante o intervalo de análise.....	61
Tabela 1 - Ensaio comportamental de variação luminosa do curso diário do sol	69
Tabela 2 - Análise de geração dia 19/07.....	71
Tabela 3 - Análise de geração dia 22/07.....	73
Tabela 4 - Análise de geração dia 01/08.....	75
Tabela 5 - Análise de Geração total; Coleta de dados condicionais.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS

BEN - Balanço Energético Nacional

LDR - *Light Dependent Resistor*

SI - Sistema Mundial De Unidades

STC - *Standard Testing Conditions*

SPA - *Solar Position Algorithm*

IDE - *Integrated Development Environment*

NF - Normalmente Fechado

NA - Normalmente Aberto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 RESUMO SOLAR.....	17
2.2 GEOMETRIA SOLAR.....	18
2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	23
2.3.1 Células Fotovoltaicas.....	25
2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos	28
2.4 SEGUIDORES SOLARES	33
2.4.1 Seguidor de Eixo Horizontal	35
2.4.2 Seguidor Polar de Eixo Único	35
2.4.3 Seguidor de Eixo Vertical ou de Azimute	36
2.4.4 Seguidor de dois Eixos	37
2.4.5 Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos	37
2.5 DISPOSITIVOS PARA CONTROLE E POSICIONAMENTO DAS ESTRUTURAS	38
2.5.1 Controle Por Sensores	38
2.5.2 Controle Sem Sensores.....	40
2.5.3 Sistemas de Controle Misto.....	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 ESTRUTURA FÍSICA DO SEGUIDOR SOLAR.....	41
3.1.1 Construção da Estrutura.....	42
3.2 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR.....	46

3.2.1 Algoritmo de acompanhamento	49
3.3 SISTEMA DESENVOLVIDO	51
3.3.1 Geração Fotovoltaica.....	51
3.3.2 Quadro e Ligações do Microcontrolador.....	52
3.3.3 Sistema de alimentação	53
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
4.1.1 Dia Ensolarado	56
4.1.2 Dia Parcialmente Nublado.....	57
4.1.3 Dia Nublado.....	59
4.1.4 Geração Total	61
5 CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS	64
APÊNDICES	69
APÊNDICE A – DADOS DO ENSAIO COMPORTAMENTAL DE VARIAÇÃO LUMINOSA DURANTE O CURSO DIÁRIO DO SOL	69
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA LÓGICO DO SISTEMA <i>TRACKER</i>.....	70
APÊNDICE C – DADOS DO ENSAIO REALIZADO DIA 19/07/2021	71
APÊNDICE D – DADOS DO ENSAIO REALIZADO DIA 22/07/2021	73
APÊNDICE E – DADOS DO ENSAIO REALIZADO DIA 01/08/2021	75
APÊNDICE F – DADOS COLETADOS PARA A QUANTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE GERAÇÃO SOLAR NO INTERVALO DEFINIDO DE 20 DIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

É fato que o mundo contemporâneo gira em torno do consumo de energia elétrica, e é nítido o crescimento da demanda a cerca desse recurso, porém, apesar de sua importância os métodos de geração mais utilizados atualmente ainda demandam um alto custo monetário e ambiental para captação e geração. No Brasil segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2021) a principal fonte que dispõe este recurso é em sua grande totalidade advinda de usinas hidrelétricas, somando um percentual de 65,2% de toda a geração na matriz energética brasileira, dessa forma o desenvolvimento de novas tecnologias que favoreçam formas inteligentes e mais acessíveis de geração vêm se mostrando cada vez mais necessárias e procuradas no âmbito da geração energética.

Assim sendo, a busca pelo aproveitamento de fontes de energia que primam pela preservação ambiental tem se mostrado cada vez mais crescente, deixando clara a necessidade de conciliação entre a geração energética e a preservação ambiental. À vista disso, introduz-se a implementação de formas de captação e aproveitamento de energias limpas, tais métodos vêm sendo fortemente desenvolvido e inovado, tomando cada vez mais destaque em todo o mundo; isso se dá por conta de todas as vantagens que elas acarretam. As energias renováveis advêm de recursos naturais que são reabastecidos naturalmente como o sol, o vento, a chuva, dentre outros; assim, os recursos para a geração as quais dispõem são praticamente infinitos, e por serem naturais não geram grandes impactos ambientais. Dentre os recursos renováveis anteriormente citados, pode-se destacar o sol, como um exemplo principal. Entre as formas de geração de energias renováveis, a energia solar fotovoltaica vem ganhando destaque no cenário mundial nas últimas décadas. De acordo com PERLOTTI (2012, apud NASCIMENTO, 2015. p.48.) a energia solar que chega em nosso planeta em uma hora, é mais do que capaz de suprir toda a demanda energética mundial anual.

A tecnologia de captação desses recursos ainda se apresenta em um estágio inicial de desenvolvimento, no caso do aproveitamento da luz solar, o efeito fotovoltaico apesar de não ser uma descoberta recente, ainda não apresenta meios para captação total sem perdas, dado que o equipamento utilizado ainda proporciona um rendimento muito baixo se comparado a quantia de luz solar disponível a ser convertida em energia elétrica; De acordo com a Empresa de Pesquisas Energéticas, a eficiência das placas solares estão entre 13% e 19% para módulos monocristalinos e entre 11% e 15% para módulos policristalinos (EPE, 2012). Vários estudos e soluções estão sendo desenvolvidos e testados, a fim de aumentar a eficiência energética dos

módulos. Um exemplo disso são os rastreadores solares, que utilizam sistemas automatizados para acompanhar o movimento do sol durante o dia. Esses sistemas permitem o alinhamento das placas solares com os raios do sol, fazendo com que fiquem mais tempo recebendo a radiação solar de forma perpendicular, conseqüentemente induzindo uma maior produção energética (LEE et. al 2009 ; MOUSAZADEH et. al , 2009).

Dessa forma, o trabalho desenvolvido tem como objetivo comparar o ganho de produção energética por meio de um sistema automatizado de posicionamento aplicado a um módulo fotovoltaico de 280W com um sistema convencional de mesma potência, de modo a quantificar possíveis ganhos ou perdas. A fim de atingir esse objetivo, desenvolveu-se um Seguidor Solar Polar, que integra dispositivos eletrônicos, um sensor baseado em LDR's (*Light Dependent Resistor*) e um atuador elétrico linear.

O Seguidor Solar foi um projeto desenvolvido pelo edital nº 01/2019 – INTERCONECTA do IFPB com o título de “Desenvolvimento de um rastreador solar polar de baixo custo em escala real”, que tem como objetivo proporcionar os dados necessários para tratamento e análise a serem expostos no decorrer da explanação. O trabalho também busca a melhoria do sensor utilizado no seguidor solar, a fim de obter a maior performance possível e por intermédio disso, tornar os dados mais precisos e confiáveis.

1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar a geração entre dois módulos solares fotovoltaicos, onde, estarão instalados de forma convencional (estática/fixa) e de forma móvel (dinâmica/seguidor solar) dispostos sobre a mesma altura e inclinação em uma estrutura de seguidor solar.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma estrutura mecânica que comporte a placa estática e a placa dinâmica.
- Desenvolver um sensor para o rastreamento do movimento solar.
- Registrar simultaneamente a produção energética de dois módulos fotovoltaicos, o primeiro instalado de forma estática (Parado) ,e o segundo de forma dinâmica (Seguidor solar).
- Comparar o desempenho de produção energética entre o sistema estático e dinâmico.

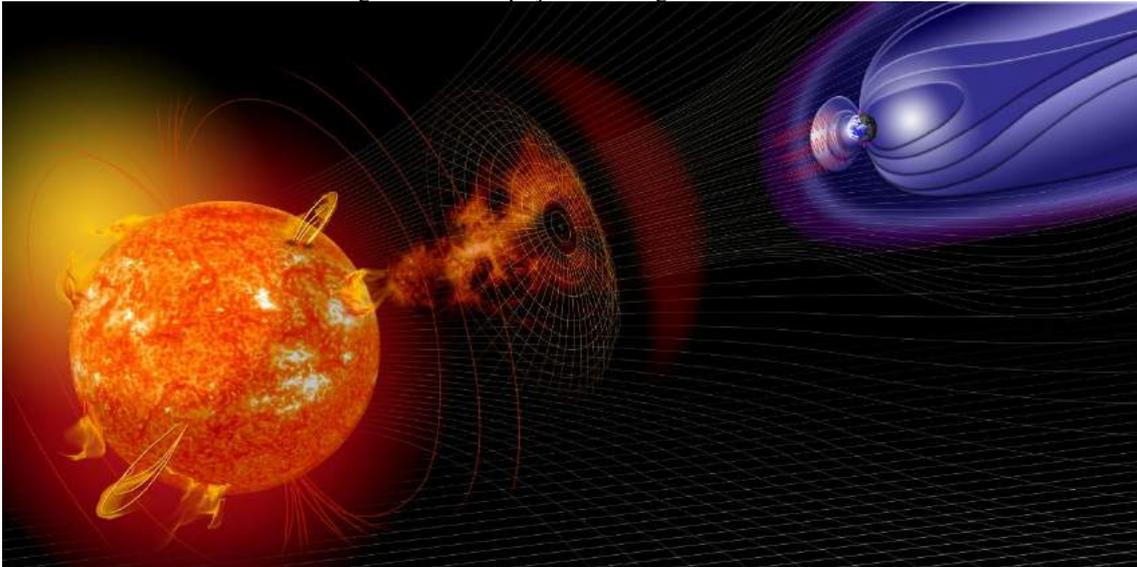
2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica a respeito dos principais conceitos relacionados com o desenvolvimento desse trabalho, abordando desde a fonte principal que dispõe o recurso a ser convertido em energia elétrica, junto a suas características e citando a sua importância geral, os conceitos relacionados à conversão energética e por fim abordando as necessidades que esse sistema apresenta, que gera a necessidade de novos meios inteligentes e inovadores de forma a garantir melhores performances por parte dos equipamentos a ele agregados, ou que o compõem.

2.1 RESUMO SOLAR

O sol é o principal astro do sistema solar, sendo ele o centro gravitacional ao qual orbitam diversos astros menores desde planetas à cometas, a estrela apresenta-se como uma fonte de energia inesgotável, se analisada em relação ao ciclo de vida humana, baseando-se também no fato de que ela fornece energia em forma de luz e calor, os quais recaem sobre todos os corpos celestes presentes no sistema solar, o bastante para regular suas funções térmicas e ciclos naturais. Essa energia é gerada por meio de um processo de fusão nuclear causado pela alta temperatura presente em seu núcleo, e se dissipa no vácuo através de ondas eletromagnéticas como ilustra a Figura 1. Segundo Gómez et al. (2018) a energia solar é responsável por alimentar todos os processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem na terra, essa energia conhecida como radiação solar ou Irradiação solar impacta diretamente sobre a vida na terra, sendo responsável pelo clima na atmosfera, e influenciando na química da atmosfera superior, da ionosfera e estratosfera.

Figura 1 – Dissipação de energia solar sobre a terra



Fonte: NASA, 2017

É da energia solar que se derivam todas as fontes de energias renováveis e não renováveis existentes no planeta, e esse fato é reforçado por Villalva e Gazoli na seguinte afirmação:

“A energia da biomassa, ou da matéria orgânica, tem origem na energia captada do sol através da fotossíntese, que é a conversão da energia da luz solar em energia química. A energia da água dos rios, usada para mover turbinas de usinas hidroelétricas, tem origem na evaporação, nas chuvas e nos degelos provocados pelo calor do Sol. A energia dos ventos tem origem nas diferenças de temperatura e pressão atmosférica ocasionadas pelo aquecimento solar. Os combustíveis fósseis como carvão, o gás natural e o petróleo também têm origem na energia solar, pois são resultados da decomposição da matéria orgânica produzida há muitos milhões de anos. (VILLALVA e GAZOLI, 2012, p 15)”

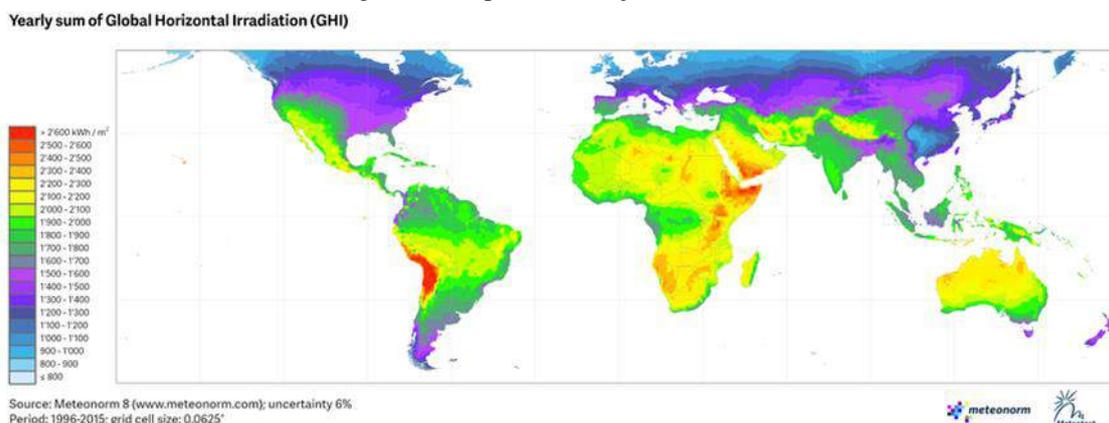
Assim sendo, a energia solar que é recebida em forma de luz e calor, pode ser considerada a fonte mais importante de energia a disposição dos corpos celestes, e atualmente, devido ao avanço tecnológico possibilitou-se a captação dessa energia para a utilização em prol das necessidades do ser humano moderno, além dos processos naturais, onde agora o calor é utilizado em fins de ambientação e comodidade, e a luz convertida em energia elétrica.

2.2 GEOMETRIA SOLAR

A distribuição de energia solar não é feita de forma uniforme, pois depende do ângulo de incidência dos raios solares sobre o corpo celeste, influenciando na absorção de energia que ocorrerá em cada região. No caso do planeta Terra, pode-se observar que determinadas regiões

recebem diferentes quantidades de calor e luminosidade como afirma Demanboro (2006), constatado na Figura 2.

Figura 2 - Mapa de irradiação solar anual mundial



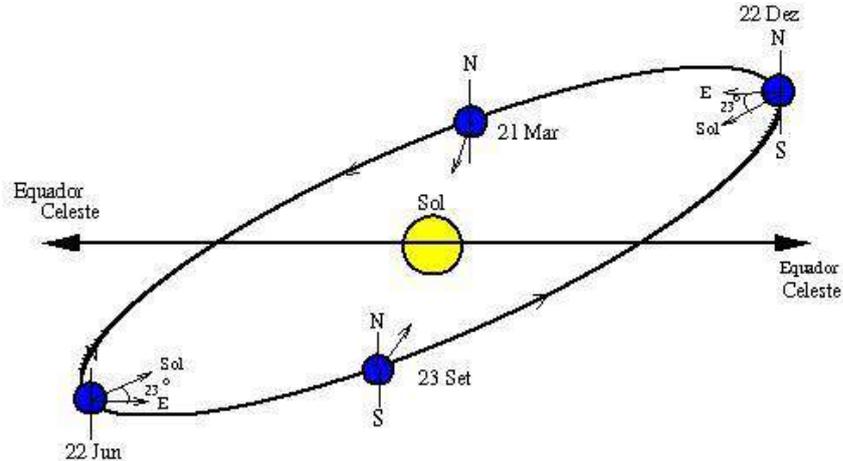
Fonte: METEORNORM, 2015

Essa variação de energia recebida ocorre em dois ciclos, sendo eles: Um ciclo anual e um ciclo diário, como afirma Martins et al. (2017, a.), esses ciclos são definidos pelos movimentos de rotação e translação terrestre, o ciclo anual refere-se ao movimento de translação, onde devido à forma elíptica de seu curso ao redor do sol e inclinação do eixo terrestre conhecida como Eclíptica ou Eclíptica, faz com que a terra em determinadas épocas do ano, encontre-se em uma posição acima do eixo do equador celeste ou abaixo dele ao decorrer de sua trajetória, juntamente a uma variação entre a distância que há entre a terra e o sol; essas características causam diferenças na irradiação solar que recai sobre a terra, criando fenômenos como as mudanças de estação.

Segundo Sanjuan (2013) essa trajetória implica numa inclinação de 23° acima ou abaixo do eixo do Equador celeste, nos períodos nos quais há uma variação entre a distância sol - terra, como ilustra a Figura 3. Esses períodos onde ocorrem o distanciamento e aproximação são conhecidos respectivamente como período Afélio e Periélio. No período afélio, no qual a terra está mais distante em relação ao sol, observa-se que a inclinação será de 23° abaixo da linha do equador celeste; por outro lado, no periélio a terra se encontra mais próxima do sol, seu posicionamento com a trajetória resulta em uma variação angular de 23° acima da linha do equador celeste, a resultante desses fenômenos são uma diferença de incidência solar nos hemisférios. Devido a essa diferença há o fenômeno chamado solstício; o solstício ocorre duas vezes ao ano, marcando o início do verão e inverno. O território brasileiro encontra-se em sua maior parte no hemisfério sul, assim sendo, o solstício de verão resultará no dia mais longo do

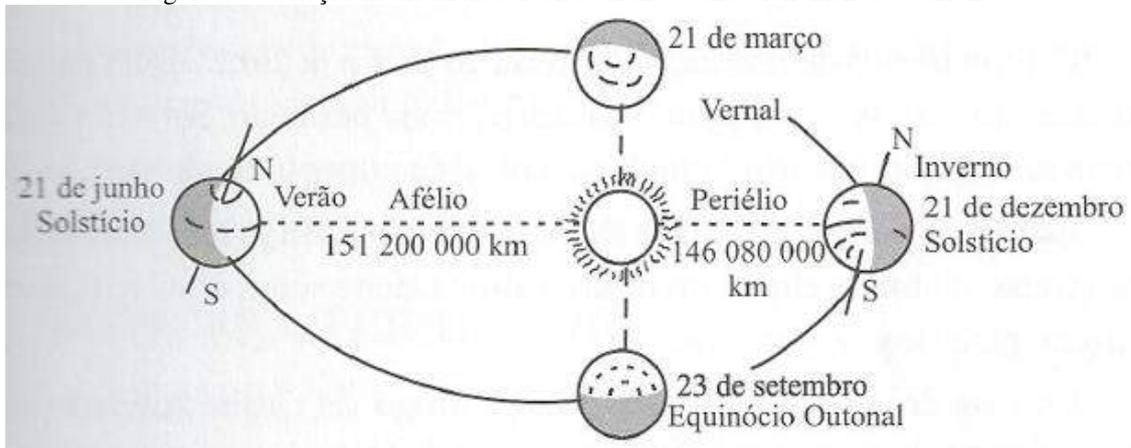
ano e na noite mais curta, enquanto o solstício de inverno resultará na noite mais longa do ano com o dia mais curto, esses fenômenos também ocorrem no hemisfério norte de forma inversa nas mesmas datas. Pode-se constatar essas relações observando a Figura 4. Quanto ao ciclo diário que corresponde ao movimento de rotação terrestre, este implica no potencial de incidência de luz solar sobre cada ponto, sendo responsável pela transição entre dia e noite.

Figura 3 – Trajetória Eclíptica Da Terra E Sua Variação Angular



Fonte: UFRGS, 2016

Figura 4 – Variação da distância sol-terra durante o ano e fenômenos decorrentes



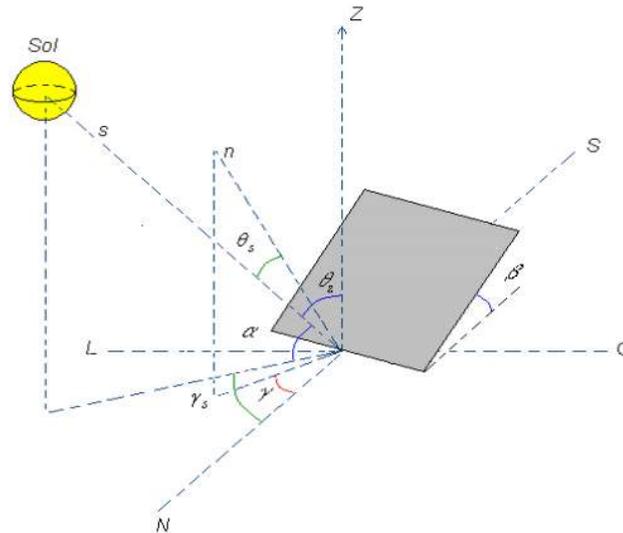
Fonte: SONNEMAKER, 2012

De acordo com Kalogirou (2016, p.91, cap.2.3.5, a.) a energia que chega à Terra pode ser definida como “Irradiância Solar”. A irradiância solar é a energia que recebida do sol, o seu total numérico é definido em uma constante conhecida como “Constante Solar”, a qual é estabelecida por unidade de tempo a uma distância média da Terra a partir do Sol, recebida em unidade de área de uma superfície normal ao Sol (perpendicular à direção de propagação da

radiação), fora da atmosfera terrestre. Sua medição é feita fora da atmosfera pois ela, afeta a quantidade de energia que chega à superfície da Terra. O primeiro método para definir a constante solar, foi desenvolvido por Samuel Pierpont Langley em 1881, que posteriormente foi homenageado, sendo Langley a unidade de medida inicial da constante solar, posteriormente convertida para Watts por metro quadrado (W/m^2) pelo sistema mundial de unidades (SI). O valor da constante solar oscila no decorrer do ano, variando de 1330 W/m^2 à 1400 W/m^2 , respectivamente, nos períodos afélio e periélio. Por conta disso geralmente considera-se o valor médio dessa variação, sendo em torno de 1366 W/m^2 (NREL,2017), esse e diversos outros dados numéricos resultantes das relações solares sobre a terra são muito importantes no contexto atual, onde a utilização dos recursos disponibilizados por fontes reutilizáveis de energia vem sendo grandemente difundidos. Esses dados são tidos como parâmetros fundamentais para o desenvolvimento de projetos, sejam arquitetônicos ou de captação energética; no caso, para o posicionamento do equipamento utilizado na captação e conversão desses recursos luminosos em energia elétrica através de módulos fotovoltaicos, tendo em vista que estes são fotossensíveis, ou seja, sensíveis à luz. Faz-se necessário o conhecimento dos diversos parâmetros angulares sobre a influência da incidência solar sobre a terra, e suas características para que haja o maior aproveitamento desta energia, que é o fator principal a ser abordado neste trabalho.

Tendo como exemplo o contexto de conversão de luz solar por meio de módulos fotovoltaicos, o potencial de energia disposta a ser convertida depende da incidência solar sobre a superfície dos módulos, assim, faz-se necessário o dimensionamento da posição baseando-se no estudo dos ângulos de incidência que relacionam o Sol e a Terra, a fim de obter sempre a maior incidência possível; dessa forma, afirma-se o conhecimento das trajetórias solares e ângulos fundamentais, como parâmetros indispensáveis para o seu dimensionamento e posicionamento, como se pode observar nos ângulos da Figura 5.

Figura 5 – Ângulos fundamentais gerados pela incidência solar



Fonte: OLIVEIRA, 2008

Na Figura 5 observa-se as relações angulares, sendo elas:

- **Ângulo de inclinação** (β) da superfície em relação ao plano;
- **Ângulo de zênite** (θ_z) que é a relação entre a vertical do local onde se situa o observador e a direção dos raios solares;
- **Ângulo de altitude solar** (α) que é formado pela diferença entre a direção dos raios solares e o plano horizontal, tendo o 0° como sendo o nascer e o pôr do Sol;
- **Ângulo de azimute solar** (γ_s) é a medida entre o plano do meridiano local e o plano máximo do círculo que passa pelo zênite e o sol;
- **Ângulo de azimute terrestre** (γ) é medido entre a projeção da normal da superfície no plano horizontal e o meridiano local;
- **Ângulo de incidência direta** (θ_s) é formado pela reta normal sobre uma superfície e o vetor Sol-Terra;

Um grande fator que exerce um papel principal na geração solar fotovoltaica é sua dependência em relação ao tipo de irradiação que chega aos módulos, uma vez que os raios solares incidentes são afetados pelos fatores climáticos e a atmosfera como um todo, juntamente a reflexão desses raios incidentes. Assim, podem ser citados como principais, dois tipos de radiação solar, sendo elas: Radiação Direta que é composta pelo conjunto de ondas eletromagnéticas que não foram desviadas de sua trajetória, ou seja, a luz solar recebida

diretamente pelo sol, sem interferências; e a Radiação Difusa, que é composta pelas ondas que sofreram interferência em seu caminho na atmosfera e nuvens, dessa forma, incidem sobre a superfície terrestre vinda de todas as direções (NEVES, 2016).

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O primeiro contato com a energia fotovoltaica ocorreu em 1839, por meio de um experimento realizado pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, que constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, quando exposto a luz. Apesar da descoberta, segundo dados da CRESESB (2006) o primeiro equipamento experimental só veio surgir em meados de 1876 e segundo Brito et al. (2006) apenas em 1954 por meio do desenvolvimento de uma compreensão mais completa sobre os materiais semicondutores, obteve-se resultados marcantes em estudos feitos por D.M. Chapin e colaboradores, do Bell Laboratory, nos Estados Unidos da América, que publicaram o primeiro artigo sobre células solares em silício com uma eficiência de 4.5%. Impulsionados pela descoberta desenvolveram ainda mais estudos sobre os materiais semicondutores, tendo em vista que, com uma compreensão ainda mais profunda sobre esses dispositivos se possibilitaria o desenvolvimento de tecnologias que compreendam uma eficiência ainda maior na conversão, por meio do efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico trata de uma reação que ocorre quando um material semicondutor é exposto à luz solar visível, e essa exposição, induz a geração de uma tensão elétrica. Segundo Pinho (2014), esse fenômeno ocorre devido às características particulares dos materiais semicondutores, eles se apresentam a nós como sólidos geralmente cristalinos, que oferecem propriedades relacionadas tanto à condução quanto ao isolamento elétrico; mais especificamente, eles possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução sem elétrons.

Os semicondutores intrínsecos (puros) mais utilizados são o Silício(Si) e o Germânio(Ge), esses elementos em si, para serem utilizados, passam por um processo de introdução de “impurezas” em sua estrutura cristalina, o qual é conhecido como “dopagem”, esse processo tem como finalidade atribuir ao material uma nova condutibilidade elétrica dependendo da intensidade da dopagem e do elemento utilizado como “impureza”. O processo de dopagem pode resultar em dois tipos de semicondutores, dependendo da estrutura atômica do dopante que pode ter um elétron a mais ou a menos em sua camada de valência em relação

ao dopado, o que denominamos dopagem tipo n. Isso ocorre quando o dopante tem mais elétrons na camada de Valência que o dopado. Como exemplo para o caso, pode-se citar o fósforo(P). Segundo o diagrama de Linus Pauling, o silício apresenta quatro elétrons em sua camada de valência que se ligam aos átomos vizinhos, enquanto o Fósforo tem cinco elétrons em sua camada de valência; assim, quando se introduz o átomo de fósforo na estrutura, haverá um elétron em excesso. Com isso, sua conexão com o átomo de origem será muito fraca, o forçando a se alocar na camada de condução. Para o tipo p, tem-se um processo onde haverá a falta de um elétron para completar as ligações com os átomos de Si, o que é denominado lacuna. Nesse caso ao invés de haver um deslocamento de elétrons há um deslocamento de lacunas. Um exemplo de dopante tipo p é o Boro (B), que conta com apenas três elétrons em sua camada de valência(MELLO, 1975.).

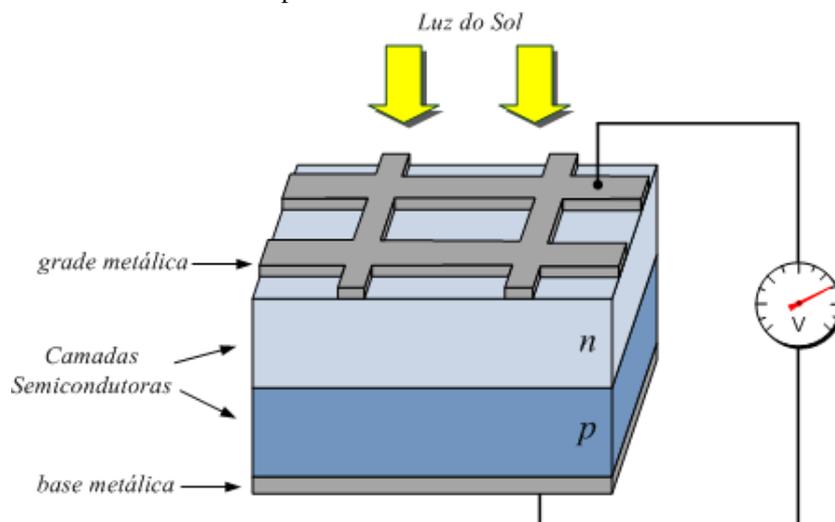
A utilização dos semicondutores na construção de dispositivos conta com a união dos materiais tipo p e tipo n, pois como afirma Carneiro (2010), a maior parte dos semicondutores é baseada nas propriedades da fronteira que há entre os materiais tipo p e do tipo n, conhecida como junção p-n; separadamente cada material tem uma concentração majoritária, seja de lacunas para o material tipo p ou de elétrons para o material tipo n; porém, ao integrar esses materiais ocorre um processo de minimização nessa desigualdade, ou seja, alguns elétrons migram para o semicondutor tipo p e algumas lacunas migram para o semicondutor tipo n, o que dá origem a cargas positivas (íon) nos semicondutores tipo n e cargas negativas (íon) no semicondutor tipo p, resultando na polarização da junção, o que ocasionará a formação de um campo elétrico permanente nas proximidades da junção, que por sua vez dificulta a passagem dos demais elétrons no lado n e lacunas no lado p, além do que, quando em equilíbrio, criará uma barreira que impede a passagem de qualquer elétron.

Além dessas características, a junção p-n quando exposta a fótons cuja energia é maior que o *gap*, sendo *gap* segundo Connor (2020) o intervalo entre a camada de valência e a camada de condução, gerará pares de elétrons-lacunas, que em regiões onde o campo elétrico é diferente de zero terá um efeito de aceleração sobre as cargas, ocasionando a geração de uma corrente elétrica através dessa junção; o deslocamento dessas cargas é o que cria uma diferença de potencial, ou seja, de energia elétrica; devido a isso, atribui-se o nome de Efeito Fotovoltaico.

2.3.1 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos que convertem a luminosidade em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Dessa forma, há a combinação de semicondutores p e n, além da introdução de contatos para a conexão das extremidades opostas do semicondutor, a fim de possibilitar a circulação de elétrons, o que pode-se observar na Figura 6, a qual ilustra os componentes e o seu processo de funcionamento.

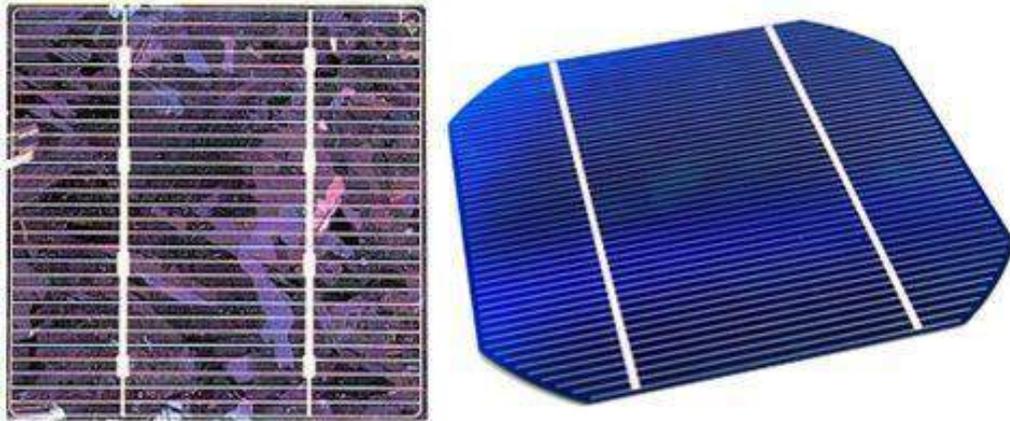
Figura 6 - Estrutura física simplificada de uma célula fotovoltaica e efeito fotovoltaico.



Fonte: UFJF, 2011

É fato que as células fotovoltaicas são feitas de material semicondutor, porém, nesse contexto, há diversos tipos de materiais semicondutores que podem ser utilizados para sua construção. Contudo, a escolha mais usual é a composta de silício cristalino devido a sua grande disponibilidade, sendo o segundo elemento mais abundante na face da Terra, motivo pelo qual é amplamente utilizado; dito isso, para sua utilização na construção dos módulos fotovoltaicos, a forma e o tratamento pelos quais passa esse silício, diz muito sobre a eficiência de cada célula fotovoltaica. No contexto atual de módulos fotovoltaicos, as células silício apresentam-se em dois tipos: Célula de silício Monocristalino e Célula de silício Policristalino (Figura 7).

Figura 7 – Da esquerda para a direita: (a) Célula solar fotovoltaica composto de silício policristalino; (b) Célula solar fotovoltaica composto de silício monocristalino.

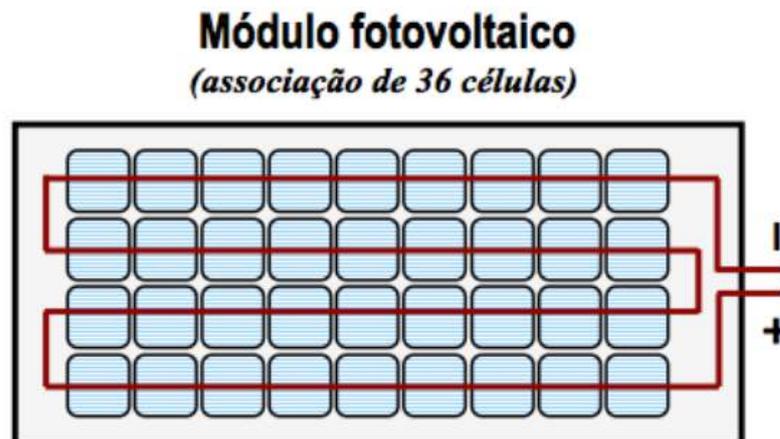


Fonte: BLUE SOL, 2019

Segundo Reis (2017, apud JURINIC, 2020), as células de silício monocristalino têm eficiência de 16%, podendo chegar à 23% em laboratório. Enquanto o policristalino apresenta uma eficiência inferior, compreendendo uma média entre 8 à 13%, onde a vantagem de se utilizar as células de silício policristalino se dará devido ao seu custo reduzido, se comparado a células monocristalinas.

No contexto de geração elétrica fotovoltaica as células fotovoltaicas são os componentes chave para a construção dos módulos fotovoltaicos (Placas solares), já que segundo Carneiro (2010) as mesmas tratam-se basicamente de diversas células dispostas sob a mesma superfície e ligadas em série (Figura 8), a fim de aumentar sua área de captação e potência, tendo em vista que cada célula por regra geral não excede a potência de 3W, o que para a maioria das aplicações seria insuficiente.

Figura 8 - Representação esquemática de um modulo fotovoltaico pela associação de várias células.



Fonte: CARNEIRO, 2010

A eficiência dos módulos fotovoltaicos caracterizar-se-á pela percentagem de luz solar que cada m^2 do painel solar converte em energia elétrica. Desta forma, tendo como exemplo um módulo cuja eficiência seja equivalente à 18% , ele converterá 18% da luz incidente para cada m^2 . Os ensaios para a definição desses parâmetros são realizados sob certas condições de laboratório, as chamadas STC (*Standard Testing Conditions* ou condições normais de ensaio), seguem os padrões adotados pela indústria solar. São três, as condições de teste: A Temperatura da Célula que deve ser de 25°C durante todo o ensaio, o índice de Irradiação solar de 1000 Watts/ m^2 , que caracteriza a energia incidente sobre uma determinada área em determinado momento, sendo este valor uma média da quantidade de luz solar que incide na superfície terrestre e a Massa de Ar de 1.5, a qual refere-se à quantidade de luz que tem que passar pela atmosfera terrestre antes que possa bater na superfície da Terra. (PORTAL SOLAR, s.d.)

O cálculo da eficiência é realizado utilizando dados de medida do módulo, sua altura e largura exatas, utilizando considerações matemáticas, para inicialmente obter a área do painel solar:

$$A_m = h_m * l_m \quad (1)$$

Onde em (1) A_m será referente a Área do modulo (m^2), h_m a Altura do módulo (m) e l a Largura do módulo (m) (PORTAL SOLAR, s.d.).

Seguido pela divisão do valor de sua potência por 10 (dez) vezes o valor da área do módulo, a fim de retornar o valor em percentagem:

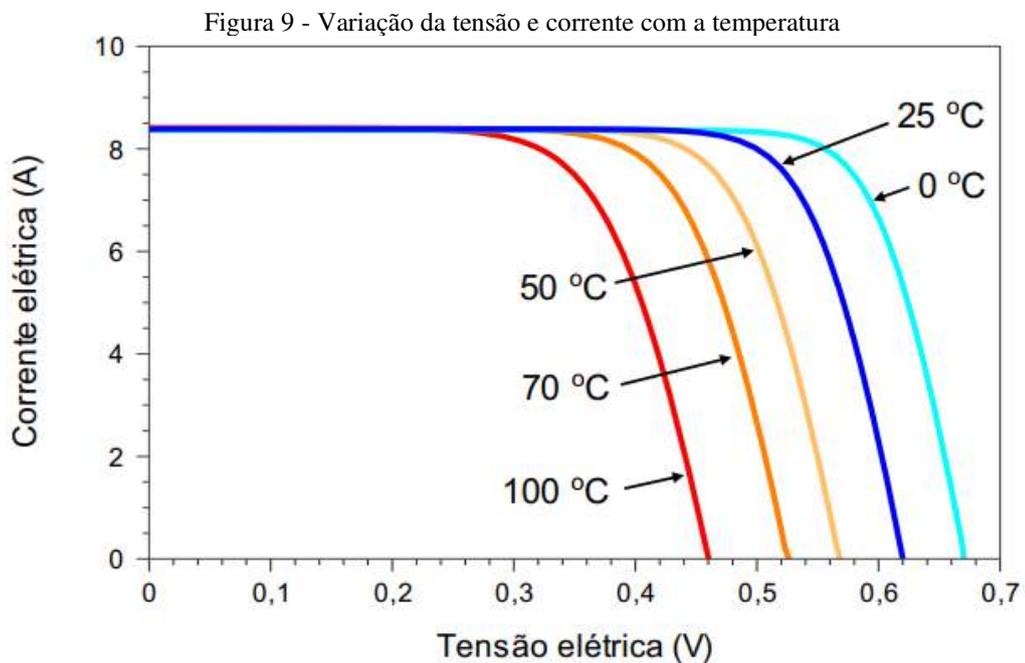
$$E = \frac{P_m}{(A_m * 10)} \quad (2)$$

Onde em (2) E refere-se a eficiência(W/ m^2), P_m é relacionado à potência do modulo (W) e A_m é a área do modulo (m^2) (PORTAL SOLAR, s.d.).

É importante diferenciar a eficiência das células fotovoltaicas da eficiência dos módulos fotovoltaicos, tendo em vista que a eficiência unitária das células é maior que a dos módulos, considera-se a eficiência do módulo como um todo(PORTAL SOLAR, s.d.). É importante considerar a influência do encapsulamento sobre as células fotovoltaicas, uma vez que, segundo Junior (2008), o desempenho de módulos fotovoltaicos é afetado pelo encapsulamento, uma vez que, o efeito da degradação sobre as diferentes combinações e materiais acarretam em mudanças consideráveis quanto às propriedades elétricas dos mesmos.

Um fator importante a ser considerado sobre os módulos fotovoltaicos é a influência que a temperatura exerce sobre eles, uma vez que o efeito fotovoltaico utiliza luz a mesma acompanha energia em forma de calor, que é um fator influente sobre a

As variações de temperatura ambiente incidente afetam o funcionamento das células fotovoltaicas que compõem os módulos fotovoltaicos. Uma vez que o aumento de temperatura tende a reduzir sua eficiência devido ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto sua corrente sofre um pequeno aumento, quase desprezível. Esse fato pode ser constatado observando a figura 9 a seguir, que mostra as curvas *I-V* em relação a diferentes temperaturas da célula fotovoltaica, sob irradiância de 1.000W/m^2 (PINHO, 2014).



Fonte: PINHO (2014)

2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos

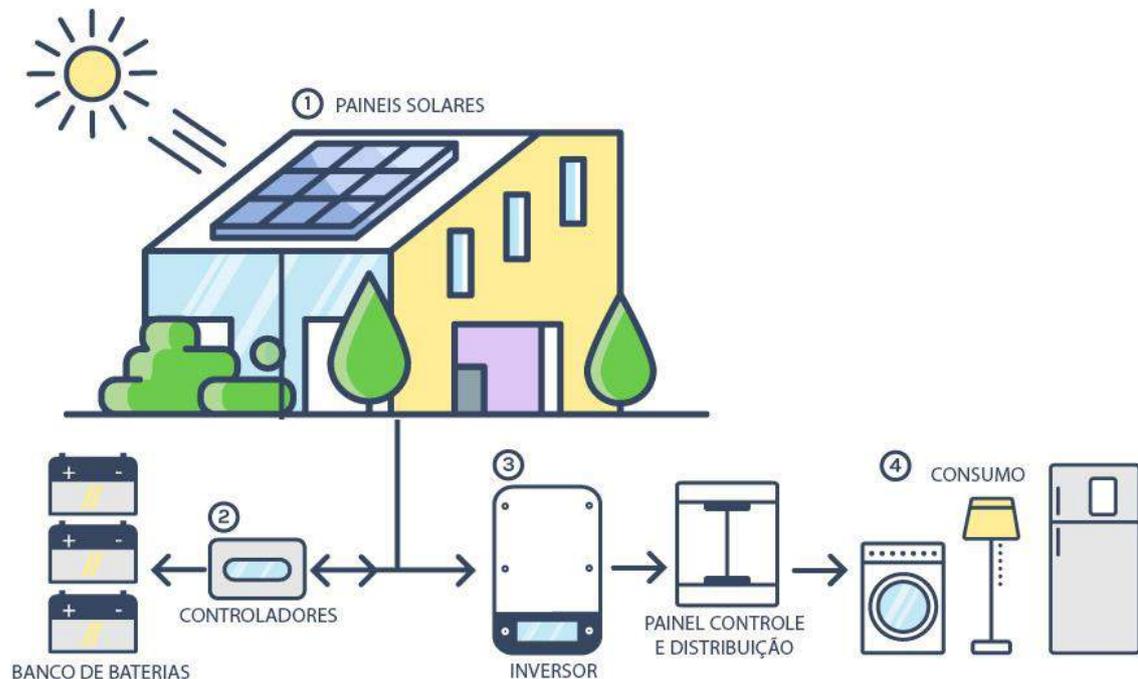
Tendo em vista o exposto, para a utilização e aproveitamento da energia fotovoltaica podem ser aplicadas três tipos de sistemas de instalação, sendo eles: Off-grid (Sistemas Isolados), On-Grid (Conectados à rede) ou híbridos (MACHADO, 2015).

2.3.2.1 Sistemas Off-Grid (Isolados)

Mesmo na atualidade, a distribuição elétrica ainda não é algo a que toda a população tenha livre acesso, isso se dá principalmente pelo fato de que há localidades onde as grandes redes de fornecimento elétrico não conseguem alcançar, principalmente por fatores geográficos, dado que, a construção de linhas de condução requer alto investimento. Nesse contexto, o método mais requisitado para a obtenção do recurso elétrico é por meio da instalação de sistemas de geração Off-Grid (Isolado) (OLIVEIRA, 2007). Esse tipo de sistema é caracterizado pela utilização de um banco de baterias que armazena a energia durante o dia a ser utilizada posteriormente ao anoitecer e dispensa conexões com a concessionária de energia ou homologação para a sua instalação e utilização. Sua utilização é mais indicada para sistemas de baixa potência, tendo em vista que a aquisição de baterias eleva os custos de projeto e demandam substituição por apresentar vida útil relativamente curta, além de poluir o ambiente (OLIVEIRA, 2007). Os principais componentes que compõem esse tipo de sistema segundo Oliveira (2007) são:

- Módulo Fotovoltaico: Converte a radiação solar em corrente elétrica;
 - Controlador de carga: Realiza a conexão entre as baterias e os módulos fotovoltaicos do sistema, regulando e controlando o fluxo de energia gerada, de forma que a bateria não descarregue ou tenha um excesso de carga, garantindo a operação adequada das baterias;
 - Banco de baterias: Armazena a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos e alimenta as cargas consumidoras ligadas ao sistema fotovoltaico;
 - Inversor: Converte a energia armazenada nas baterias de corrente contínua para corrente alternada, para alimentar as cargas conectadas ao sistema fotovoltaico;
 - Proteções (CA-CC): Itens de proteção contra surto elétrico;
- A instalação desses componentes segue o esquemático ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Esquemático de instalação de um sistema de geração Off-grid



Fonte: Modificada pelo Autor; <https://solarmartins.com.br/>(2021)

2.3.2.2 Sistemas On-Grid (Conectados à rede)

Esse tipo de sistema solar dispensa o uso de um banco de baterias, ou outros tipos de acumuladores. A energia produzida por meio desse sistema pode ser consumida diretamente pela carga ou injetada diretamente na rede convencional, atuando como uma fonte de geração auxiliar ao sistema elétrico em que está conectado, gerando uma redução do consumo de energia advinda das empresas de abastecimento de eletricidade (PINHO, 2014; KALOGIROU, 2016).

Esse tipo de sistema fotovoltaico apresenta grande popularidade, sua utilização é grandemente difundida em diversos países europeus, Japão, Estados Unidos, que possuem programas de incentivo a favor da utilização da tecnologia de geração fotovoltaica (PINHO, 2014). Vale salientar que a utilização desse sistema vem paulatinamente se desenvolvendo no Brasil, esse fato advém da implementação da Resolução Normativa 482 da ANEEL de 2012, que veio com intuito de incentivar aos consumidores brasileiros a geração própria de energia, através da transformação de qualquer excesso de geração distribuída em créditos, que são convertidos em desconto no valor da fatura, o chamado *net metering* (ANEEL, 2018).

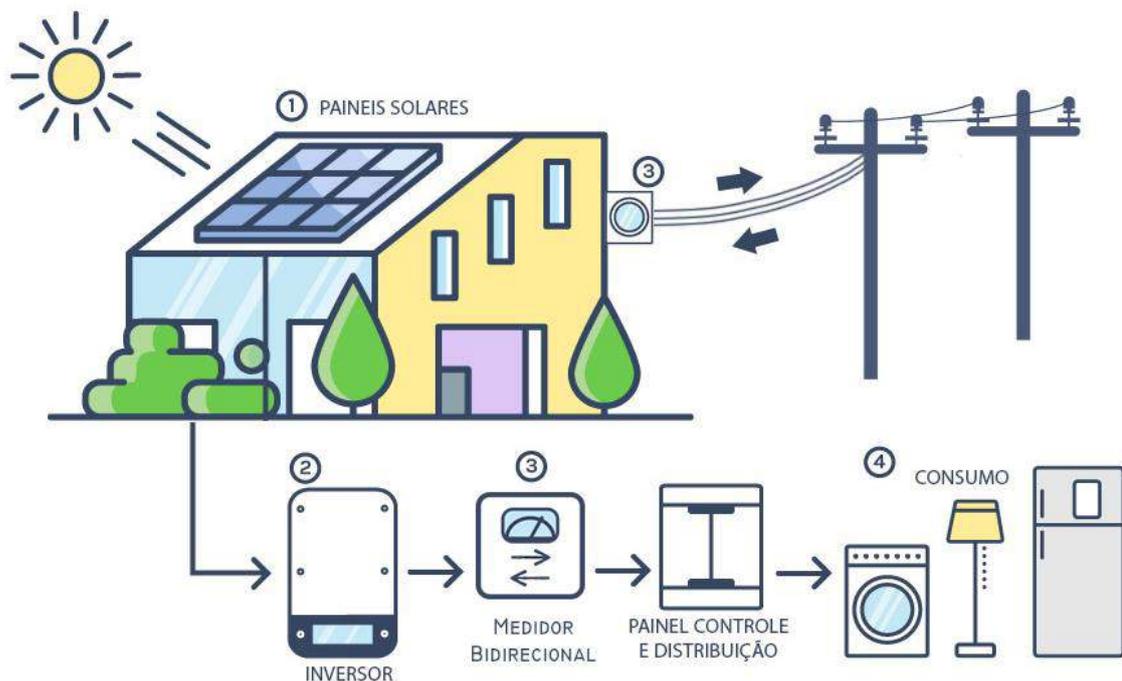
Além do fato de dispensar a utilização de baterias, em contrapartida aos sistemas off-grid, os sistemas fotovoltaicos *on-grid* permitem instalação de potências que compreendem

desde poucos kWp, no caso de instalações residenciais, até alguns MWp em grandes sistemas operados por empresas ou usinas solares, porém a utilização desse tipo de sistema está sujeita a homologação por parte da unidade de abastecimento de eletricidade local. Esse tipo de sistema é composto por:

- Módulo Solar: Responsável pela conversão da radiação solar em corrente elétrica;
- Inversor Solar: tem como função a conversão da energia em corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente Alternada (CA), pronta para utilização e/ou inserção na rede elétrica convencional;
- Proteções: Itens de proteção contra surto elétrico;
- Medidor Bidirecional: Contabiliza o potencial gerado e consumido pela unidade;

A instalação desses componentes segue o esquemático ilustrado na figura 11 abaixo:

Figura 11 – Esquemático de instalação de um sistema de geração On-grid



Fonte: Modificada pelo Autor; [https://solarmartins.com.br/\(2021\)](https://solarmartins.com.br/(2021))

2.3.2.3 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos combinam as principais características que compõem os sistemas On-grid e Off-Grid, este caracterizado por estar conectado à rede como o sistema On-grid e

contar com um banco de baterias em sua composição como no sistema Off-grid, que atua como opção de armazenamento do excedente gerado a ser utilizado para suprir falhas na rede de energia comum, reduzir custos com o consumo noturno, entre outras aplicações (OCAENERGIA, 2021). Ainda segundo o OcaEnergia(2021) esse tipo de sistema apresenta uma série de vantagens que vão além da economia proporcionada pelos sistemas convencionais, sendo elas:

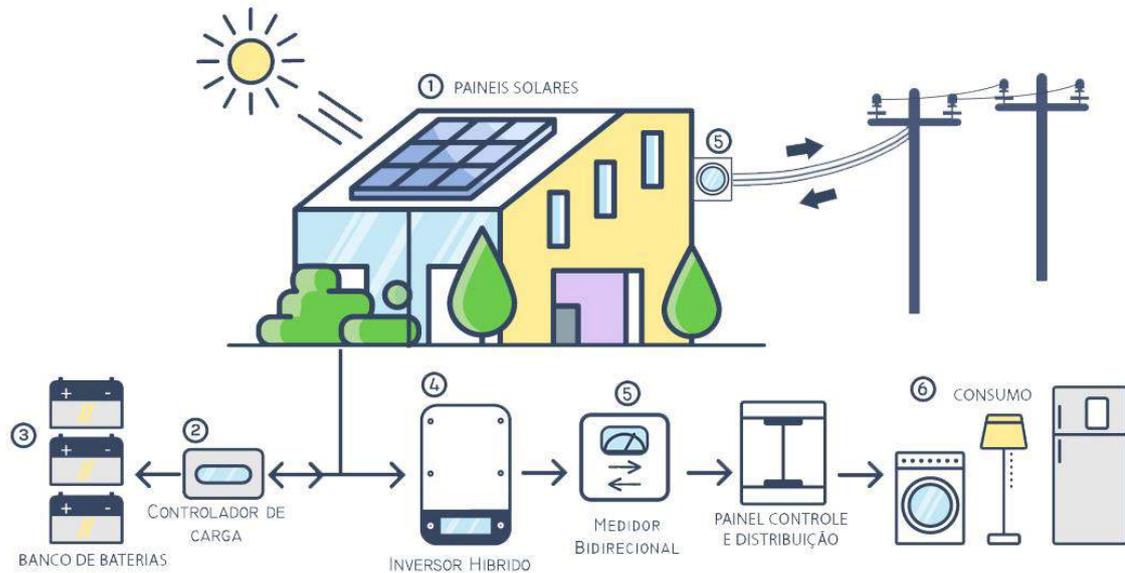
- Armazenamento de energia solar para ser usada a noite.
- Independência energética mais abrangente, por estar sempre disponível em situações de falha na rede de fornecimento energético como por exemplo em casos de apagão.
- A conta de energia sofre uma redução ainda maior, dado que, quando mais necessita de energia consome-se a energia das baterias (por exemplo, durante a noite).
- Permite o uso mais prudente da eletricidade.
- Também é possível usar a energia gerada pelo sistema fotovoltaico híbrido em diversas outras aplicações, podendo até carregar carros elétricos, independente do horário do dia, e até mesmo durante quedas de energia.

Contudo, a utilização desse tipo de sistema abriga também as desvantagens presentes nos sistemas convencionais, sendo elas:

- Maior investimento devido a presença do banco de baterias em sua composição.
- A vida útil das baterias está entre 7 a 15 anos que é considerada curta, se comparada a dos módulos que é de 25 anos.
- Devido à complexidade na instalação do sistema e a presença de um banco de baterias, requer espaço maior.
- A depender do tipo de inversor, pode ser que o consumidor tenha que limitar o número de cargas ligadas ao mesmo tempo.

A figura 12 ilustra a integração dos componentes que compõem esse tipo de sistema.

Figura 12 – Esquemático de instalação de um sistema de geração On-grid



Fonte: Modificada pelo Autor; [https://solarmartins.com.br/\(2021\)](https://solarmartins.com.br/(2021))

2.4 SEGUIDORES SOLARES

Os seguidores solares são equipamentos mecânicos desenvolvidos com a finalidade de orientar um painel solar ou um conjunto de painéis solares, mantendo-os sempre perpendiculares à radiação solar incidente, dado que, segundo Valcacer et al. (2014) a radiação e conseqüentemente incidência solar em uma área que se estende perpendicularmente em relação aos raios solares é sempre maior que em uma área horizontal de mesmas dimensões; objetivando o aumento da incidência solar sobre os mesmos por intermédio do acompanhamento do curso do sol ao longo do dia; tendo em vista que, como anteriormente discutido, o efeito fotovoltaico está intimamente relacionado a incidência de fótons sobre a superfície coletora. Assim, quanto maior a incidência de luz solar, maior o rendimento da conversão de energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico.

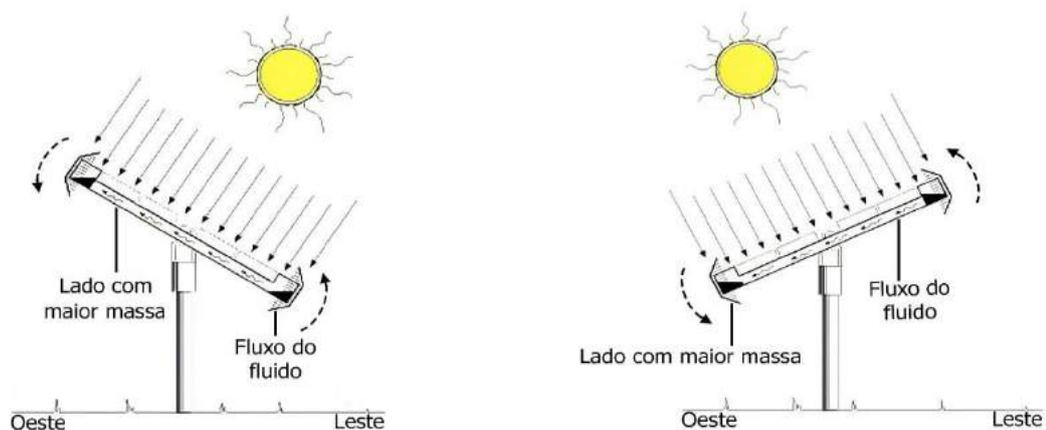
Existem diversos modelos de seguidores solares, os quais variam em custo complexidade e funções, diferentes tipos de seguidores representam diferentes precisões baseado em seu método de trabalho ou sua estrutura. Pinto (2010) os descreve como capazes de serem classificados de diversas formas, porém, dentre elas a forma mais comum de classificação é pelo seu número de eixos, os quais atualmente podem ser de um ou dois eixos. Os seguidores de um único eixo podem ser orientados de forma polar em relação ao sentido Norte-Sul ou Leste-Oeste, quanto aos de eixo duplo, trata-se de utilizar um eixo para ajustes relacionados à variação do azimute da estrutura e o outro eixo para o curso diário de inclinação dos

módulos(CORTEZ, 2013); desta forma, na literatura são citados estudos sobre os seguintes modelos:

- Seguidor de Eixo Horizontal;
- Seguidor Polar de Eixo Único;
- Seguidor de Eixo Vertical ou de Azimute;
- Seguidor de dois Eixos;
- Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos;

A essas estruturas podem ser aplicadas diferentes estratégias de rastreamento de posição, sendo elas, de forma Ativa ou de forma Passiva. O rastreamento de forma ativa caracteriza-se pelo consumo de energia em seu acionamento, dessa forma, impulsionados por motores elétricos e conjuntos de polias ou engrenagens contando com um sistema composto por sensores, controladores e atuadores, ou seja, todos elementos baseados em eletrônica, seja ela analógica ou digital, a fim de conferir maior confiabilidade; enquanto que o rastreador de forma passiva dispensa a utilização de energia elétrica em seu acionamento pela utilização de uma mecânica que compreende o deslocamento de fluidos como elemento impulsor para seu acionamento. Segundo Beltrán (2007) este fluido se desloca dentro da estrutura mecânica à medida que é aquecido pela radiação solar incidente, e através da mudança da força de gravidade na estrutura, gerará um novo ponto de equilíbrio como ilustra a Figura 13. O fluido mais comumente utilizado para esse propósito é o freon, por apresentar um ponto de ebulição baixo, o que proporciona fácil indução quanto à mudança de densidade necessária para os fins designados (BELTRÁN, 2007). A desvantagem dessa estratégia de rastreamento, é estar sujeita à vários distúrbios, como a força do vento e a falta de radiação solar em dias nublados, tendo em vista que a dilatação do fluido depende deste fator.

Figura 13 – Esquema de funcionamento de uma estrutura de seguidor solar passiva

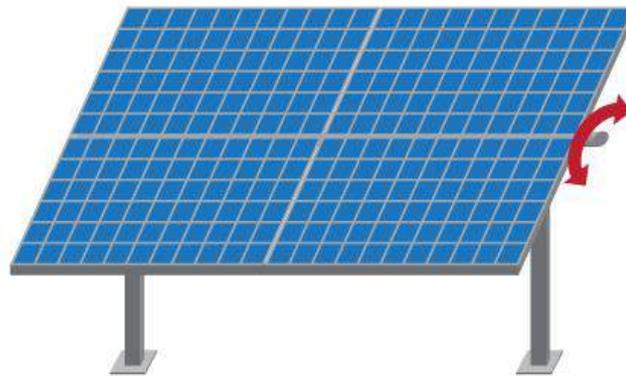


Fonte: Modificado pelo autor; BELTRÁN, 2007

2.4.1 Seguidor de Eixo Horizontal

Este tipo de seguidor apresenta um eixo principal horizontal o qual é utilizado como pivô para os módulos, e que possibilita a rotação dos mesmos sobre o eixo horizontal que é necessário para o acompanhamento do sol em seu curso diário. Este tipo de seguidor apresenta uma constituição simples e ocasionalmente um custo reduzido, além de comportar um grande número de painéis que podem compartilhar o mesmo sistema de controle por estarem concentrados no mesmo eixo (CORTEZ, 2013). A Figura 14 a seguir ilustra um seguidor solar de eixo Horizontal.

Figura 14 – Seguidor solar de eixo horizontal

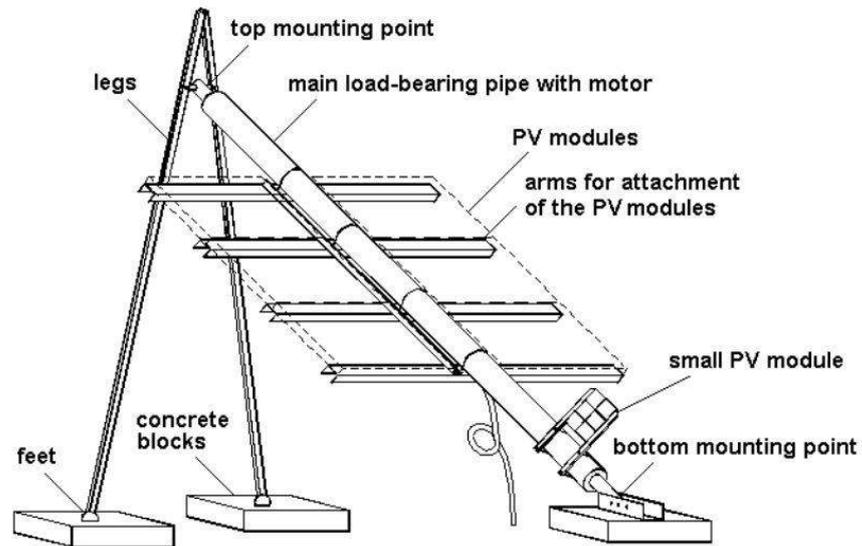


Fonte: ENERGIAS MADEIRA, 2021.

2.4.2 Seguidor Polar de Eixo Único

Este tipo de seguidor é caracterizado pela inserção de uma compensação angular no eixo de sua estrutura em graus referentes à latitude do local onde é instalada, e de forma paralela ao eixo polar norte-sul, este tipo de montagem garante a perpendicularidade dos módulos em relação ao sol quando ocorrerem os equinócios da primavera e outono, em qualquer outro dia haverá um pequeno erro, esse tipo de estrutura geralmente utiliza um pequeno módulo fotovoltaico que auxilia na alimentação do sistema de controle e acionamento, e que também serve de sensor para o seguimento solar (POULEK et al., 1998 apud OLIVEIRA, 2018). A Figura 15 ilustra a estrutura básica de um seguidor solar polar de eixo único.

Figura 15 - seguidor solar polar de eixo único

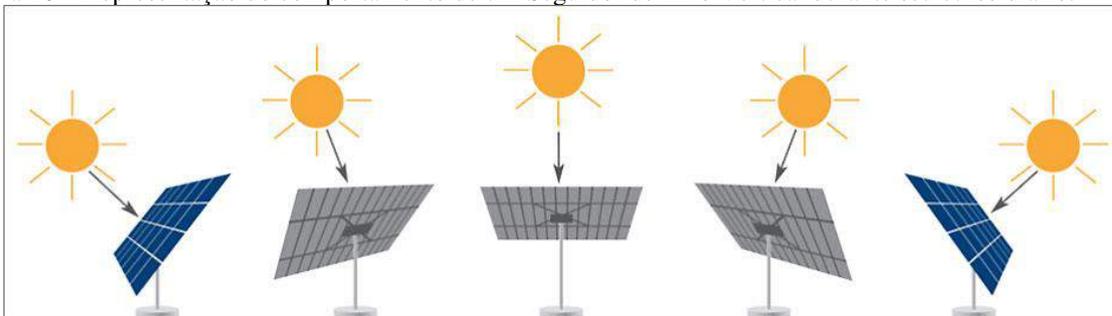


Fonte: CORTEZ, 2013

2.4.3 Seguidor de Eixo Vertical ou de Azimute

Esse tipo de seguidor conta com um motor impulsor acoplado a seu eixo vertical, que permite uma rotação em relação a esse eixo, de forma a seguir o sol acompanhando a variação do ângulo azimutal ao decorrer do dia, ou seja, seguindo o caminho aparente do sol realizado de Leste a Oeste Figura 16. Para melhor rendimento ao longo do ano, a instalação desse modelo é feita de forma que seja configurada inclinação sobre a superfície de seus módulos igual a latitude do local em que é instalado o equipamento (BELTRÁN, 2007).

Figura 16 – Representação do comportamento de um Seguidor de Eixo Vertical durante seu curso diário.

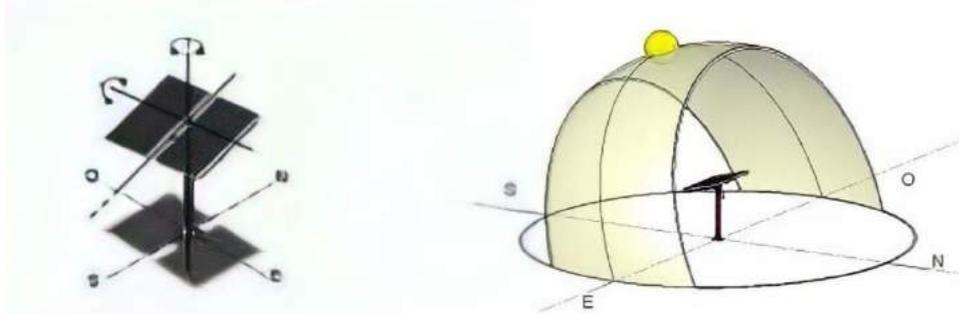


Fonte: PORTALSOLAR, 2016.

2.4.4 Seguidor de dois Eixos

Este tipo de seguidor apresenta uma estrutura que conta com um poste vertical (eixo), o qual, na estrutura é responsável pela realização do acompanhamento em relação ao sentido Leste-Oeste, e um eixo horizontal fixado ao vertical, o qual permite um movimento relacionado ao sentido Norte-Sul, essas características conferem movimentação azimutal (eixo vertical) e de inclinação (eixo horizontal)(CORTEZ, 2013). Este modelo de seguidor tende a manter a superfície dos módulos sempre perpendicular ao sol durante todo o ano, o mesmo acompanha todas as trajetórias solares conhecidas durante o ano (SANJUAN, 2013), como ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Representação da estrutura e funcionamento de um Seguidor de dois Eixos

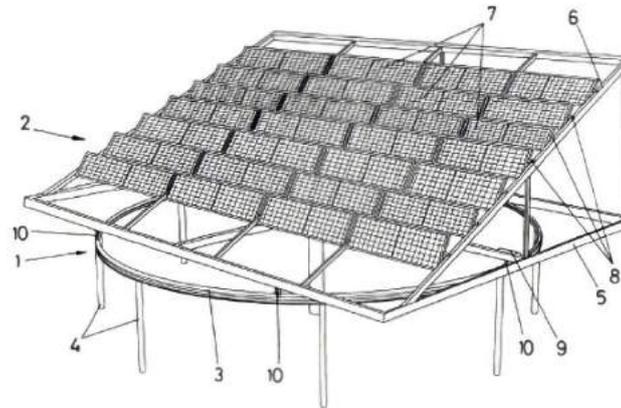


Fonte: BELTRÁN, 2007

2.4.5 Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos

Este seguidor trata de uma plataforma circular que gira sobre sua base (fixa ao chão) para dessa forma realizar o acompanhamento no sentido Leste-Oeste; sobre a plataforma se encontram os módulos dispostos em fileiras, cada fileira dispõe de um eixo horizontal que realizará o movimento relacionado ao sentido Norte-Sul Figura 18. Este tipo de seguidor apresenta uma construção simples, porém é muito robusto e comporta um grande número de módulos, e sua estrutura demanda muito espaço. (CORTEZ, 2013)

Figura 18 – Estrutura de um seguidor tipo Plataforma Rotativa de dois Eixos



Fonte: Cortez, 2013.

2.5 DISPOSITIVOS PARA CONTROLE E POSICIONAMENTO DAS ESTRUTURAS

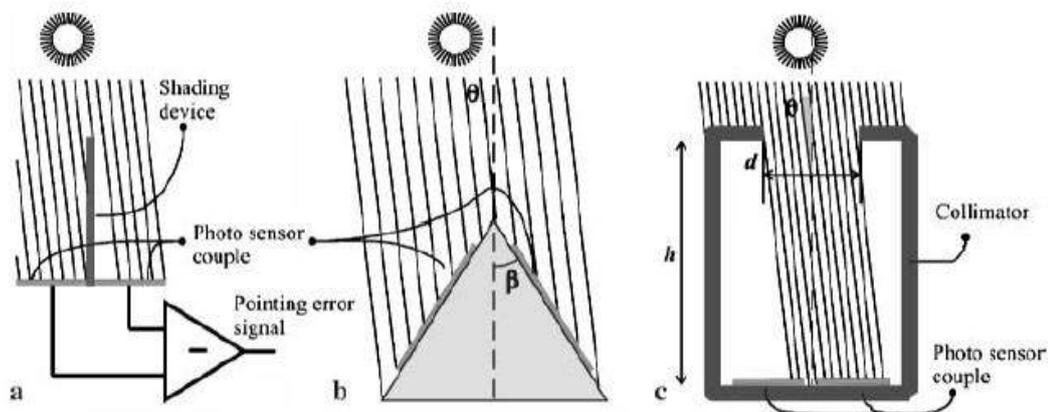
Como citado anteriormente, as estruturas mecânicas têm como objetivo possibilitar o acompanhamento do sol durante seu trajeto, seja diário ou anualmente; porém, para que isso seja possível, as estruturas ativas demandam a atribuição de sistemas de controle para auxiliar esse processo, os quais apresentam suas particularidades relacionadas a algoritmos ou outros métodos para a determinação do curso do sol. Esses sistemas de controle podem ser desenvolvidos em malha aberta ou malha fechada, por meio da aplicação de algoritmos que calculam o posicionamento solar utilizando equações matemáticas, fotossensores e até mesmo os dois.

2.5.1 Controle Por Sensores

Os sistemas de controle podem utilizar dispositivos fotossensíveis como entrada de valores para determinar a posição do sol. Esse tipo de controle é feito em malha fechada e geralmente utiliza dois sensores, um por eixo; estes quando não alinhados ao sol, retornam valores ou correntes divergentes; desta forma, expressando o desalinhamento dos mesmos em relação aos raios solares. Sua desvantagem é que os fotossensores devem ser iguais, ou devem retornar valores semelhantes que possam ser mapeados, de forma a garantir leituras precisas, caso contrário resultará na imprecisão das medições, juntamente a vida útil dos fotossensores,

tendo em vista que a deterioração deste equipamento é um fator existente e que impacta diretamente sob a precisão dos mesmos. A utilização de fotossensores é acompanhada por estruturas que favorecem a diferenciação da direção dos raios solares e sua análise, e em alguns casos a acentuação de sua sensibilidade; a Figura 19, ilustra os tipos de estruturas e técnicas usuais para implementação desse tipo de controle, onde, a Figura 19. a. representa a análise de ângulo de incidência solar diferenciada pela inserção de um obstáculo entre dois fotossensores; a Figura 19. b. ,funciona sob o mesmo princípio, porém o posicionamento angular dos fotossensores favorece a sensibilidade e precisão dos dados luminosos captados; a Figura 19. c. conta com a utilização de fotossensores dentro de um dispositivo Colimador¹ e seu funcionamento consiste no fato de que a existência de radiação solar em apenas um dos fotossensores indica que o módulo não está perpendicular à incidência solar. Desta forma, a verificação de diferentes valores de corrente nos fotossensores, comanda os atuadores de forma que o seguidor solar efetue a rotação para a posição correta (NASCIMENTO, 2015).

Figura 19 - a) Sensor utilizando barreira central para referencias de direção por sombreamento, b) Sensor angular para atenuação da sensibilidade, c) Sensor de posição utilizando colimador.



Fonte: Cortez, 2013.

Outro modo de definir a trajetória solar é através da utilização de câmeras ou sistema de aquisição de imagem para determinar a posição e a trajetória solar, esse método é conhecido como **Visão Artificial**, e consiste na definição de uma posição central no campo de visão da mesma e através de um algoritmo visa manter o sol nesse ponto durante o curso diário. Esse tipo de sistema demanda a utilização de filtros de proteção para conservação do equipamento,

¹ Colimador é um dispositivo limitador de feixe, construído a partir de um material que absorve radiação, usado para direcionar e/ou suavizar feixes de radiação, muito utilizado em sistemas de radiografia de raios-x e em telescópios. (Britannica)

visto que a exposição direta desse equipamento à luz solar por períodos de tempo extensos causaria danos e possivelmente saturação. Esse método de acompanhamento solar usa algoritmos com maior complexidade em relação aos seguidores com fotossensores e demanda muita manutenção e cuidados, suas vantagens são: Resolução e precisão maiores, visão periférica expandida e uma gama diversificada de algoritmos de detecção e identificação a ser implementados superando as possibilidades se comparado ao sistema que utiliza fotossensores (NASCIMENTO, 2015).

2.5.2 Controle Sem Sensores

Geralmente esse tipo de controle é efetuado por um algoritmo desenvolvido em malha aberta, que por meio de operações matemáticas calcula e prevê a localização do sol em determinados momentos do dia e/ou ano, dessa forma posicionando os módulos nessas coordenadas (CORTEZ, 2013). Esse tipo de algoritmo calcula dados relacionados à declinação solar, onde, dependendo da complexidade do algoritmo é possível definir a posição precisa do sol, a ascensão solar e a posição elíptica do sol. Para tal utiliza-se geralmente como referência a data, hora e ano; porém, quanto maior a precisão do sistema, maior a demanda de dados para aumento da precisão, como a temperatura, pressão, latitude e longitude. Esse tipo de algoritmo consegue desenvolver seu trabalho com grande precisão, citando como exemplo o algoritmo SPA (*Solar Position Algorithm*) que garante grande precisão com erros máximos de até $0,003^\circ$ para grandes períodos de tempo (BLANCO-MURIEL, 2001).

2.5.3 Sistemas de Controle Misto

Cortez (2013) descreve esse tipo de sistema caracterizando-o pela utilização dos métodos anteriormente citados, onde é geralmente desenvolvido em malha fechada, de forma a compreender a utilização de algoritmos que calculam a posição do sol em conjunto com dispositivos fotossensíveis, de forma a aumentar a precisão das medições e cálculos; com isso, favorecer a confiabilidade do sistema. Sua vantagem é a possibilidade de poder usar algoritmos de menor confiabilidade para determinar uma posição aproximada do sol e em seguida utilizar sensores para fazer a localização do sol de forma mais precisa.

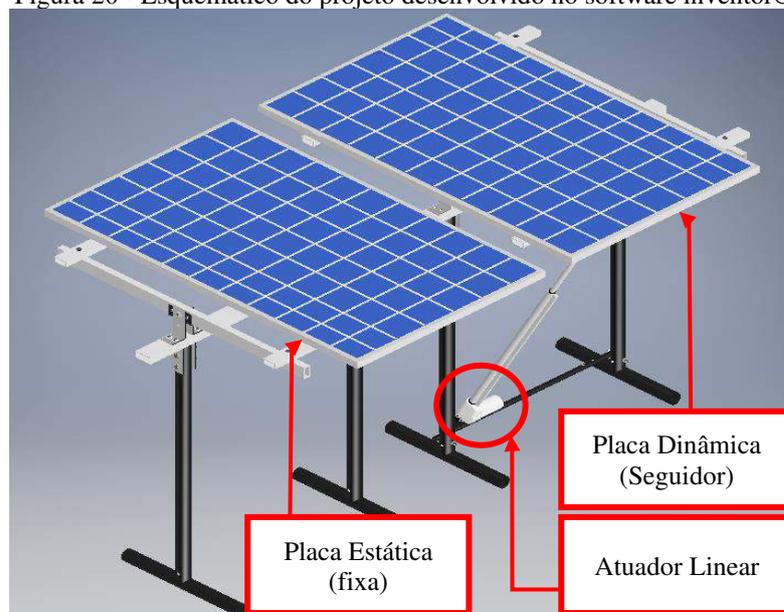
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo abordará as atividades e ensaios desenvolvidos a fim de atingir os objetivos, descrevendo os processos necessários para tal. Desde a criação e construção de um modelo de seguidor solar em escala real, de forma a comportar dois módulos fotovoltaicos de mesma potência e expô-los sob as mesmas condições (altura e angulação), ao desenvolvimento de um sensor de rastreamento solar que pudesse garantir um acompanhamento confiável do sol em seu curso diário. Posteriormente integrados a equipamentos de geração on-grid a fim de quantificar a energia gerada e permitir sua análise.

3.1 ESTRUTURA FÍSICA DO SEGUIDOR SOLAR

Antes da aquisição dos materiais necessários para desenvolver a parte prática do projeto, foi desenvolvido um esquemático 3D no software inventor®, que serviu como modelo base para a construção da estrutura mecânica, auxiliando quanto a visualização de conexões e encaixes pertinentes a estrutura, além de possibilitar o dimensionamento e a escolha dos materiais a serem utilizados para a sua construção como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Esquemático do projeto desenvolvido no software inventor®



Fonte: Autor (2019).

3.1.1 Construção da Estrutura

A construção da estrutura iniciou-se com o desenvolvimento da estrutura que acopla os módulos fotovoltaicos, sendo eles, dois módulos Monocristalinos de 280W de mesmo fabricante. Para o desenvolvimento optou-se pela utilização de tubos retangulares de alumínio para a montagem. A resistência proporcionada por este material mostrou-se suficiente para suportar o peso dos módulos, isso juntamente às propriedades inoxidáveis do alumínio que proporcionam uma maior resistência às intempéries do clima, ao qual a estrutura fora exposta. Na construção da estrutura para disposição dos módulos fotovoltaicos, foram utilizados como molde os próprios módulos a serem acoplados, de forma a realizar um encaixe firme dos mesmos à estrutura. Vide Figura 21 ilustrada abaixo.

Figura 21 - Montagem da estrutura para as placas.



Fonte: Autor (2019).

Mediante a finalização da construção das estruturas base para os módulos, o próximo passo foi o desenvolvimento do sistema com eixo de rotação central, ou seja, a conexão da base com o principal eixo sustentador da estrutura, de forma a atribuir o movimento angular necessário para o funcionamento do sistema ao decorrer do dia. A conexão dessas estruturas demanda a utilização de conectores com ângulo de 90° de forma a fixar a base ao eixo central da estrutura e permitir a realização de movimento da estrutura que sustenta os módulos. Desta forma, para realizar essa tarefa optou-se pela utilização de “dobradiças de portão para chumbar” ilustrado na Figura 22, como suporte de apoio para eixo, devido principalmente ao fato de poder

ser encontrada em qualquer loja de materiais de construção, além de prover praticidade e flexibilidade em seu manejo atendendo aos requisitos de angulação necessários, proporcionando posicionamento e conexão de forma esperada, exigindo apenas simples adaptações, como o corte de extremidades cisalhadas e amassadas, e um furo de centro para conexão do eixo principal.

Figura 22 - Dobradiça adaptada utilizada como suporte de apoio para eixo



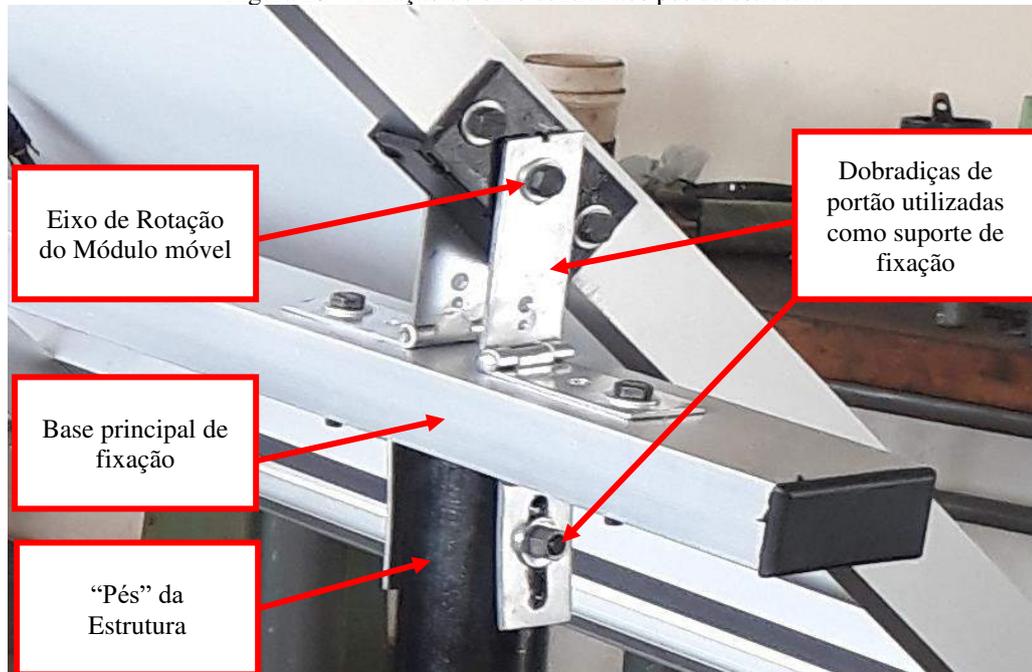
Fonte: Autor(2019).

Dadas as características supracitadas, as dobradiças foram utilizadas também para fixar a base principal aos “pés” da estrutura, desta forma atuando como conector universal; porém, à conexão da base dos módulos foi furado, enquanto a conexão com os pés da base foi fresada, criando uma fissura que servira para o ajuste de altura e posicionamento, caso necessário.

Desta forma foi feita a fixação entre a parte superior da estrutura ao apoio principal, por se tratar de um seguidor solar cujas características seguem princípios semelhantes a estrutura de seguidor Polar de Eixo Único, a fixação teve que ser feita de forma a proporcionar uma compensação angular no eixo principal em graus referentes à latitude do local onde fora instalada, desta forma, foi dada uma compensação equivalente à 6° , bem como o posicionamento da estrutura foi feito de forma a deixá-la voltada para o norte, tendo em vista que, no hemisfério Sul, o Sol nasce no Leste, sobe se inclinando ao Norte e se põe no Oeste, a atribuição desta orientação é de suma importância, pois a mesma é responsável pela maximização da captação da luminosidade da área de contato, entre o módulo e o sol.

Para a confecção dos “pés” da estrutura, foram aproveitados tubos de aço que se encontravam inutilizados no laboratório de Usinagem, os mesmos foram cortados, soldados e fixados ao eixo principal utilizando as peças de cantoneiras fresadas que pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 – Fixação do eixo central aos pés da estrutura



Fonte: Autor(2019).

Para efetuar o movimento de acompanhamento, foi utilizado um atuador linear de 12V CC, composto por um sistema de transmissão baseado em engrenagens e fuso que apresenta início e fim de curso interno. Porém esse equipamento foi superdimensionado, de modo que a capacidade suportada por ele é em muito superior a carga aplicada, assim, o trabalho efetuado é muito leve se comparado à capacidade máxima suportada. Este equipamento foi acoplado entre os pés da estrutura e a base que sustenta o módulo dinâmico, como ilustra a Figura 24; o que possibilitou um curso de movimento de 270°, sendo o necessário para a plena captação.

Figura 24 – Atuador linear acoplado à estrutura.



Fonte: Autor(2019).

A inserção de dois módulos monocristalinos de 280W sobre a estrutura permite que os experimentos possam ser executados sob as mesmas condições quanto à altura e angulação, além do fato de que se fazendo deste método os dados obtidos para a análise comparativa são ainda mais confiáveis, dado que, os dois estarão expostos às mesmas condições climáticas, durante o mesmo período experimental; dito isso, a estrutura foi posicionada no último bloco do campus, único local com espaço aberto e altura suficiente para comportar a estrutura e prover plenas condições de geração solar, ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Estrutura posicionada e fixada na posição e orientação designadas para a coleta de dados

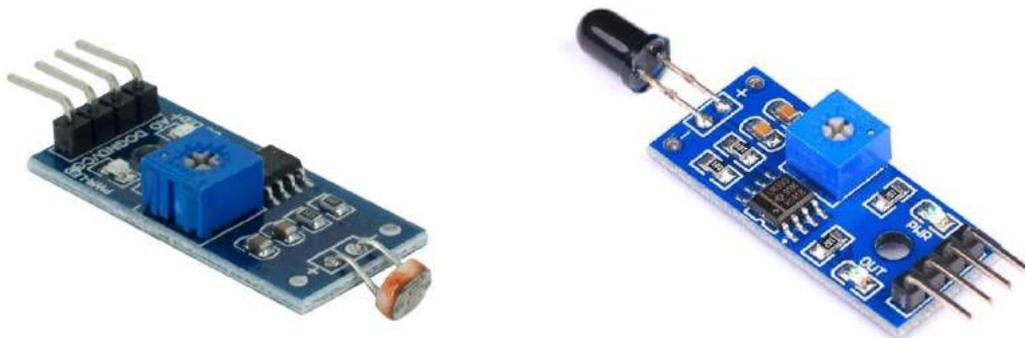


Fonte: Autor(2019).

3.2 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR

Com a conclusão da montagem do primeiro protótipo do seguidor para teste, o próximo passo foi a criação do sistema responsável pelo controle do posicionamento dos módulos, ou seja, do sensor e sua respectiva programação lógica para o funcionamento. Com intuito de captar os valores de luminosidade e assim posicionar o seguidor no ponto onde a concentração da mesma seria maior, optou-se pela utilização de LDR's (*Light Dependent Resistor*) como dispositivos de entrada para captação dos dados de luminosidade, ao decorrer do projeto foram utilizados também *shields* sensores IR (*Infrared* ou Infravermelho), para os testes iniciais de funcionamento, ilustrados na Figura 26 abaixo; porém, devido a influência das intempéries do clima, a durabilidade destes *shields* foi insuficiente para um funcionamento prolongado confiável, tendo em vista que os desgastes afetam o funcionamento e valores retornados por eles; desta forma, para utilizar fotossensores LDR, foi desenvolvido um circuito de forma mais robusta em uma protoboard, além da aquisição e utilização de LDR's equipados com lentes colimadoras¹, a junção destes aparatos resultou em um sistema de aquisição de valores confiável e duradouro, tendo em vista que o mesmo suportou a utilização contínua sob condições climáticas e exposição solar em testes práticos, sem alterações de funcionalidade ou defeitos.

Figura 26 – Da direita para a esquerda respectivamente; a. Módulo Sensor IR 4 pinos; b. Módulo Sensor LDR



Fonte: AliExpress (2021).

O sensor funciona por meio da utilização de um sistema de barreira central para referências de direção por sombreamento, juntamente com a comparação dos valores de dois sensores LDR's posicionados à mesma altura e fixados a faces opostas de uma estrutura geométrica cujo fora implementado como ilustra a Figura 27 abaixo.

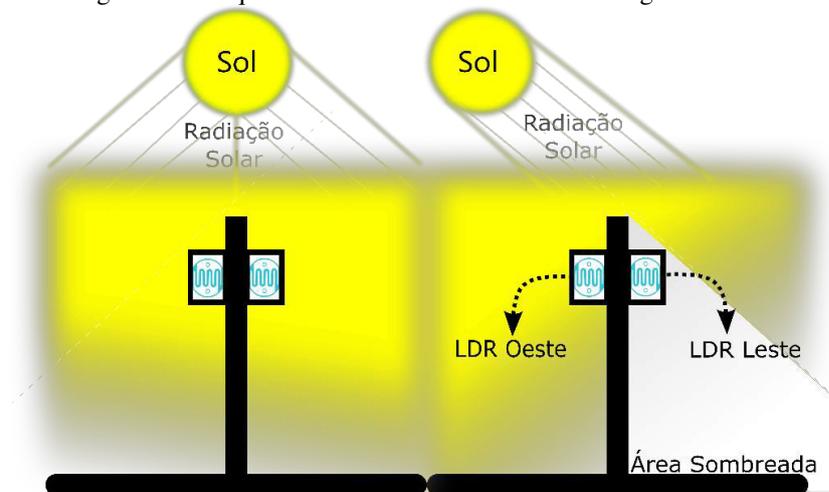
Figura 27 – Da esquerda para a direita, segue: Conjunto de LDR's com lentes colimadoras posicionados na estrutura do seguidor solar; Geometria de barreira central para referencias de direção por sombreamento.



Fonte: Autor (2021).

O sensor foi fixado ao mesmo eixo que o módulo dinâmico (Seguidor solar), de forma que através da barreira presente na geometria estrutural do mesmo, atenua qualquer efeito causado pela variação na posição solar, uma vez que a estrutura do sensor opera por meio da criação de sombra sobre a face sensora cuja não esteja centralizada ao sentido da luminosidade, como ilustra a figura 28. Com isso, ao decorrer do dia conforme a mudança da posição do sol na abóbada celeste em conjunto com a variação da incidência angular sobre o sensor advinda desse fenômeno, seu efeito será mais aparente e considerável aos LDR's, favorecendo o reconhecimento e diferenciação das variações luminosas impostas ao sensor.

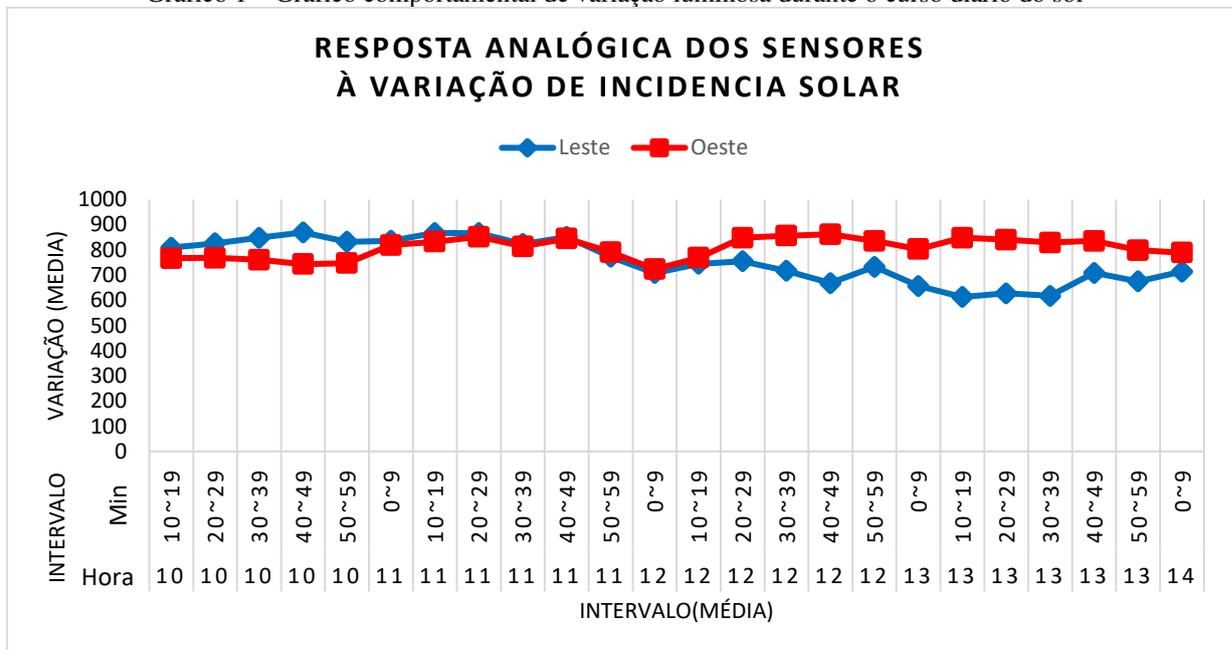
Figura 28 – Esquema de funcionamento do sensor seguidor solar



Fonte: Autor (2021).

O comportamento do sensor perante o curso diário do sol pôde ser constatado em um ensaio realizado, onde o sensor permaneceu em uma posição fixa na estrutura do seguidor solar, simulando uma utilização usual, com um algoritmo de funcionamento direcionado a coleta de dados para uma análise, dessa forma foi implementado apenas uma rotina de análise e gravação dos valores retornados pelos sensores LDR em um SDcard (Dataloger) a cada 1 segundo, posteriormente tratado, por meio da soma dos valores unitários em um intervalo de 10 minutos, posteriormente submetido a média aritmética. Dessa forma, o sensor permaneceu imóvel durante horários estabelecidos, onde a criação de sombras pela variação solar é mais evidente e notável, esse comportamento é ilustrado no gráfico 1 a seguir e demonstrados na Tabela 1 presente na **APÊNDICE A**.

Gráfico 1 – Gráfico comportamental de variação luminosa durante o curso diário do sol



Fonte: Autor (2021).

O gráfico ilustra os valores retornados pelos sensores (que variam entre 0 e 1024) devido a mudanças de luminosidade em um intervalo entre às 10h10min da manhã à 14h09min da tarde. A definição desse intervalo está relacionada ao fato de o posicionamento do sol passar por seu zênite, na qual sua orientação no período da manhã localizada à leste muda para uma variação à oeste que segue seu curso até se pôr. Essa afirmação é reforçada, pois, pode-se observar que no período matutino a maior concentração de luz solar advém do sentido Leste, atingindo o zênite entre 11h50min e 12h19min onde há o cruzamento dos valores de origem e acompanhamento, e novamente o surgimento de um aumento significativo da luminosidade

agora advinda do sentido oeste. A lógica agregada a utilização do sensor leva em consideração as comparações de valores ilustrados no gráfico e fenômenos como encontros ou cruzamentos de valores, em que o encontro das linhas de valores representa uma proximidade ou igualdade entre os valores retornados, o que se compreende como equilíbrio, que é o estado buscado em todas as situações. E os cruzamentos, a mudança de direção dos fluxos luminosos dada a mudança de turno (manhã para tarde) que ocorre com a passagem do sol pelo ponto de zênite, as variações diferenciais desses valores e o distanciamento das linhas é compreendido como desequilíbrio e requisita ao sistema o comando de movimento a fim de posicioná-lo em um ponto onde os valores entrem em equilíbrio, dessa forma a fazer com que os módulos sempre estejam voltados ao sol diretamente, forçando-os a sempre buscar o estado semelhante a um pseudo zênite solar.

3.2.1 Algoritmo de acompanhamento

Para a realização da atividade designada ao sensor seguidor solar, o algoritmo leva em consideração os valores retornados pelos sensores LDR, dispostos em faces opostas da geometria de barreira da base do sensor, como descrito anteriormente, a mudança na posição do Sol sobre a geometria do sensor irá fazer com que haja a aparição de sombras sobre a face oposta ao sentido do movimento solar, esse desequilíbrio de luminosidade entre as faces sensoras ocasionará uma diferença nos valores retornados que é compreendida pelo algoritmo como uma condição de desequilíbrio, onde, segundo a lógica implementada deverá ser corrigida e restituída à sua posição de equilíbrio. Com a finalidade de corrigir esse estado é realizado um comando para ativação do atuador no sentido de maior luminosidade, de modo a reposicionar o sensor, e ocasionalmente a estrutura em um ponto onde a luminosidade disposta sobre as faces sensoras atingirá a igualdade, ou que a subtração numérica modular dos valores retornados por eles, resulte em um valor dentro de um intervalo específico, pré-programado ou Faixa de medição (“Range”), sob estas circunstâncias seria cumprida a condição de equilíbrio, a qual ocasionaria em um comando para cessar o funcionamento do atuador caso estivesse em movimento, ou para que permanecesse imóvel, todo esse processo com base nos dados de luminosidade.

A lógica de controle foi programada de forma a realizar verificações periódicas dos valores retornados pelos sensores a cada 12 minutos, tempo suficiente para que o sol se movimente e gere sombreamento mais significativo entre os LDR's, assim, evitando que o

atuador fosse acionado a todo instante, de forma a evitar desgastes e condicionar menor consumo energético.

Este algoritmo condicional cíclico estará em vigor até a noite, quando os valores retornados pelos LDR's, serão muito baixos. Para fins de programação foi designado o valor de luminosidade retornado para essa condição igual ou menor que 190, obtido de forma empírica nos testes de funcionamento do seguidor solar, dito isto, o microcontrolador permanece por um intervalo de tempo predeterminado de 30 segundos, para então entrar no chamado "Loop de Fim de dia". Analisando se há alteração destes valores e por conseguinte obtendo resposta afirmativa, será realizado o comando referente seja ao movimento ou ao equilíbrio, caso a resposta seja negativa, será reconhecida a falta de luminosidade e, assim se fará ativa a condição de retorno ao início de curso, de forma que ao amanhecer do dia o módulo esteja devidamente posicionado e pronto para realizar um novo ciclo de acompanhamento.

A programação também conta com a definição de condições no algoritmo objetivando a economia de energia, tendo em vista que o consumo energético advindo do uso do seguidor solar deve ser deduzido do percentual produzido pelo módulo dinâmico. Assim, devido a variação angular admitida pela estrutura do seguidor, o primeiro ajuste de posicionamento ocorre às 9h da manhã e o último às 15h por atingir o fim de curso, e com o acionamento da rotina de fim de dia, das 18h15min até às 18h20min, horário posterior ao pôr do sol; desta forma, em qualquer horário fora destes intervalos, manter a fonte de alimentação responsável pela energização do atuador elétrico linear seria irrelevante, dado que, a fonte tem uma parcela de consumo considerável, dessa forma, a programação através de um relé faz o controle de acordo com os horários em que a fonte deve permanecer ativa para que haja um consumo energético inferior, de forma a realizar a mesma tarefa com gastos energéticos otimizados. O algoritmo como um todo realiza todo o processo diário relativo ao trabalho de acompanhamento solar de forma automatizada, uma vez que o mesmo limita a operação humana a apenas uma ativação inicial ou desligamento total, trabalhando em um regime cíclico, perpétuo, independente. O funcionamento desse programa segue o Fluxograma ilustrado na figura 34 ilustrada no **APÊNDICE B**.

3.3 SISTEMA DESENVOLVIDO

Para que a integração dos aparatos desenvolvidos fosse realizada de maneira satisfatória foram desenvolvidos quadros de comando e linhas de ligação entre os componentes que integram o seguidor solar, os tópicos a seguir abordam, de forma independente cada um desses sistemas ilustrando-os de forma a firmar suas funções gerais no sistema como um todo.

3.3.1 Geração Fotovoltaica

Para a análise e obtenção de dados referentes ao rendimento, dois módulos fotovoltaicos foram utilizados, ambos do mesmo fabricante e com a mesma potência de pico (280Wp). Para o teste, foram utilizados equipamentos de geração do tipo *on-grid*, no caso, um micro-inversor *grid tie* da marca Hoymiles, modelo MI-1200 e a DTU W100 da mesma fabricante, esta que, por sua vez, tem a importante função de enviar as informações de geração fotovoltaicas do micro-inversor ao banco de dados da fabricante, onde são salvos e disponibilizados para a visualização em qualquer dispositivo conectado à internet com as credenciais de acesso (login e senha), além de permitir o acompanhamento da geração em tempo real à uma taxa de amostragem de 15min; esses equipamentos estão ilustrados na figura 29. a e figura 29. b respectivamente. É importante destacar que o micro-inversor utilizado trabalha com suas entradas de forma independente, tendo cada uma delas um MPPT (*Maximum power point tracking*) buscando garantir a geração máxima possível de energia de cada módulo fotovoltaico (HOYMILES, 2020).

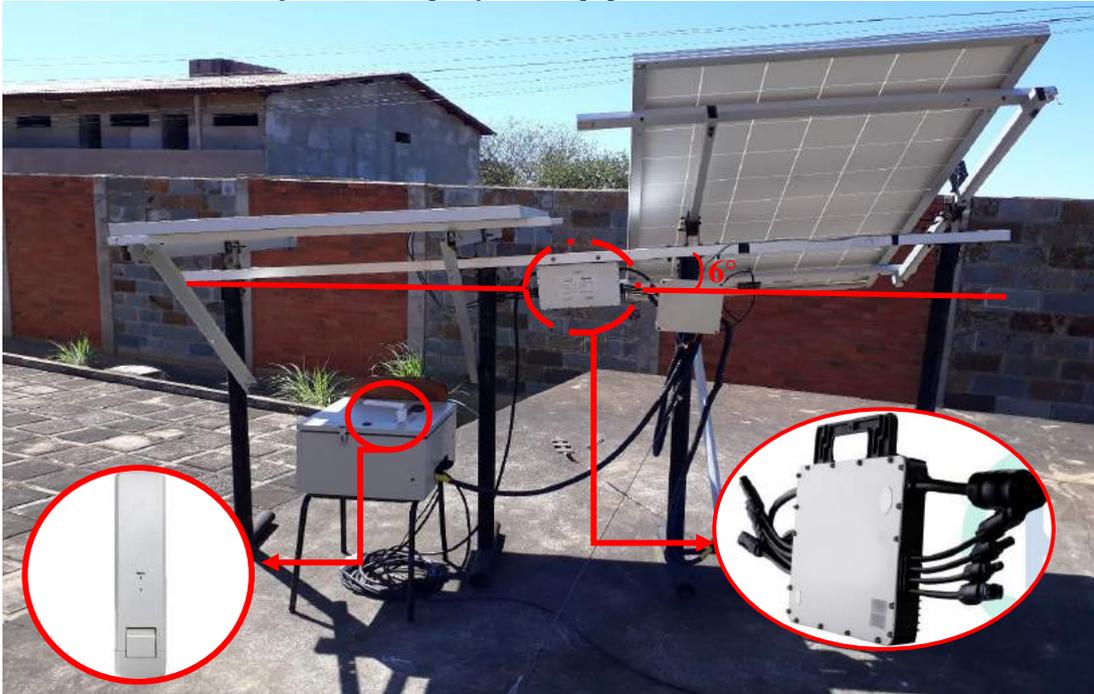
Figura 29 – a. Inversor Hoymiles MI-1200; b. DTU Hoymiles W100 Da esquerda para a direita respectivamente



Fonte: Hoymiles (2020).

Esses equipamentos foram dispostos na estrutura, o microinversor localizado entre os módulos e a DTU foi alocada no quadro de alimentação do sistema, ilustrado na figura 30 abaixo.

Figura 30 – Disposição dos equipamentos na estrutura.



Fonte: Hoymiles; modificado pelo autor (2021).

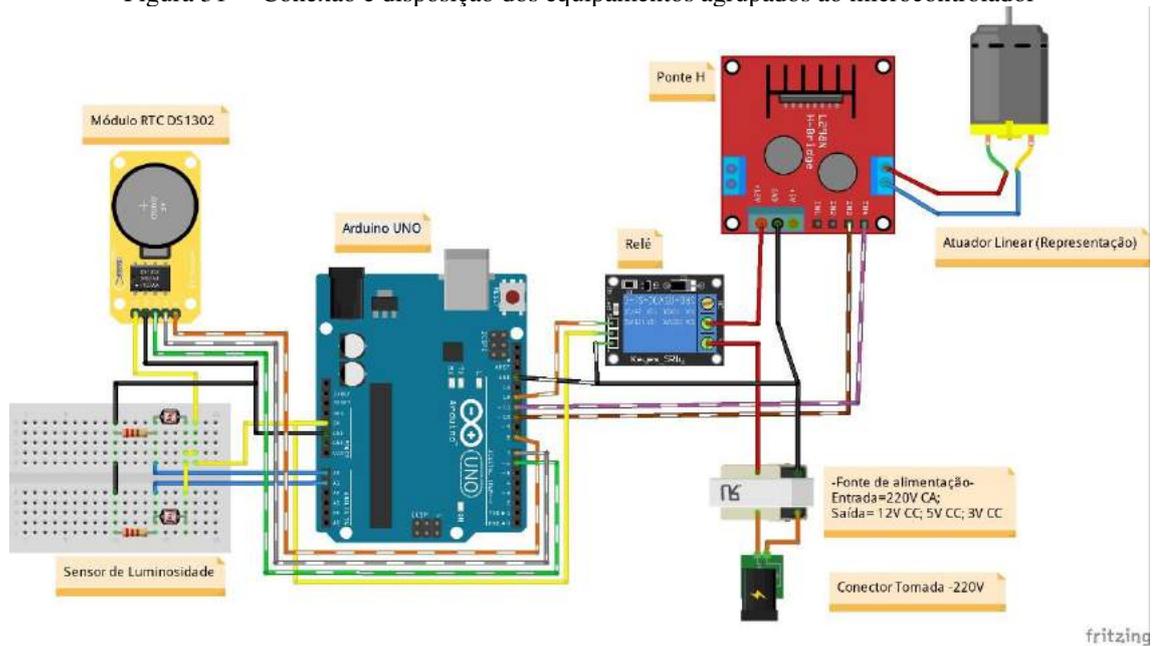
3.3.2 Quadro e Ligações do Microcontrolador

O quadro de ligações do microcontrolador engloba os componentes de controle e seus afins, ou seja, compreende todos os elementos responsáveis pela realização do algoritmo de acompanhamento desenvolvido, anteriormente citado, esse sistema é composto por:

- Arduino UNO;
- Shield Relé;
- Shield Ponte H;
- Shield RTC;
- Circuito de proteção e análise dos LDR's.

E sua disposição e conexões segue o esquemático ilustrado na figura 31 a seguir.

Figura 31 – Conexão e disposição dos equipamentos agrupados ao microcontrolador



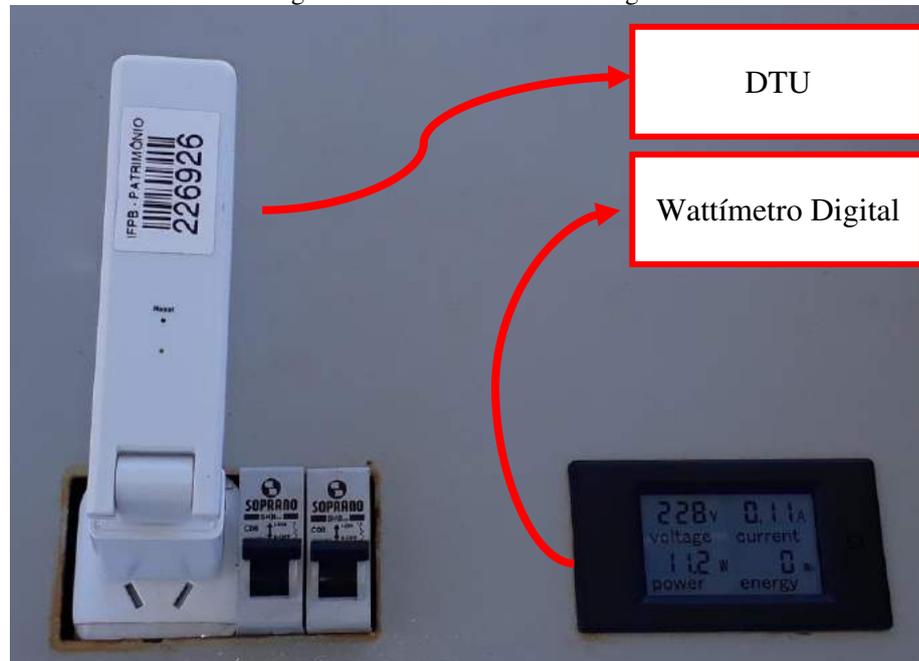
Fonte: Autor (2021).

3.3.3 Sistema de alimentação

Para os fins de alimentação dos componentes eletrônicos, foram necessárias diversas entradas de alimentação, uma vez que o atuador utilizado opera em 12V CC e o Arduino em 5V CC, o que levou a inicialmente utilizar uma fonte de alimentação CC variável, equipamento presente no laboratório do campus, geralmente utilizado em experiências de eletrônica básica, como fonte dessas diferentes tensões que o sistema demanda. Porém, a sua utilização se mostrou ineficiente para o projeto, pois, segundo análises de consumo realizadas nos equipamentos por meio de um wattímetro digital (Figura 32) acoplado a alimentação principal, observou-se que seu funcionamento como um todo, resultou em um consumo demasiadamente alto, pelo fato do mesmo se tratar de uma junção de diversos transformadores, reguladores de tensão e entre outros diversos componentes, assim, com a finalidade de reduzir o consumo energético dos conversores da fonte variável, optou-se pelo aproveitamento de uma fonte de alimentação de computador, onde, seu desenvolvimento apesar de simples, proporciona a possibilidade de alimentação em todas as tensões elétricas que o sistema demanda com um consumo inferior. O wattímetro digital presente no quadro de alimentação geral possibilita a quantificação do consumo energético do sistema de acompanhamento do seguidor solar, onde o mesmo é composto pelo atuador linear, a fonte de alimentação, microcontrolador e afins. Essa

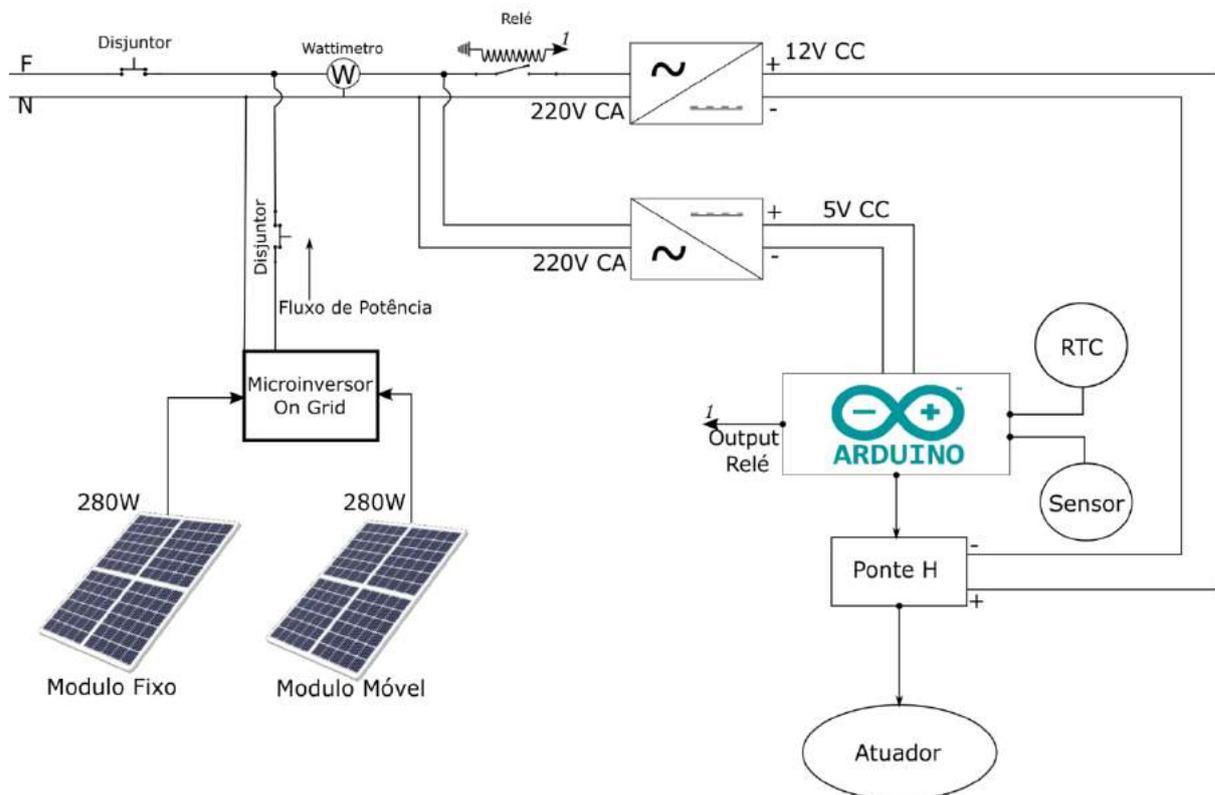
quantificação é realizada levando em conta o ciclo de trabalho diário da estrutura (24h). O esquema de ligação foi montado conforme o descrito na figura 33.

Figura 32 - DTU e Wattímetro digital



Fonte: Autor (2021).

Figura 33 - Esquemático de ligação do quadro de alimentação do sistema.



Fonte: Autor (2021)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a finalização da construção e posicionamento do protótipo, além dos ensaios anteriormente citados, iniciou-se a etapa de coleta de dados, a fim de avaliar o desempenho do módulo fotovoltaico instalado de forma dinâmica em relação ao módulo estático, os ensaios foram realizados no IFPB campus Cajazeiras-PB (Latitude -6.890263 e Longitude -38.543692) do dia 15/07/2021 à 04/08/2021, com exceção do dia 30/07/2021 devido a um erro na rede de internet do campus que impossibilitou o envio dos dados de geração ao servidor do fabricante do equipamento, assim, totalizando 20 dias de coletas de dados, durante esse período, o sol nascia por volta das 5h30min e o pôr do sol, por volta das 18h, porém, devido a presença de alguns obstáculos como muros e o próprio telhado do campus, a coleta de dados foi realizada do intervalo de 6h30min à 16h45min de forma ininterrupta.

Para avaliar o ganho energético do seguidor solar em relação ao módulo fixo, ambos foram operados em conjunto, onde, com a aquisição dos dados, foi desenvolvida uma análise do ganho entre os sistemas para cada dia, essa análise foi realizada por meio da equação (3) que fora deduzida tomando como base a equação de variação percentual e de margem de lucro líquido, considerando que os potenciais de geração dos módulos utilizados são iguais em posição fixa, uma vez que os módulos utilizados são de mesma potência e mesma fabricante, toma-se o valor do potencial gerado pelo módulo fixo como valor base, resultando na equação descrita abaixo.

$$D(\%) = \left[\frac{Pd-CCA}{Pe} - 1 \right] * 100 \quad (3)$$

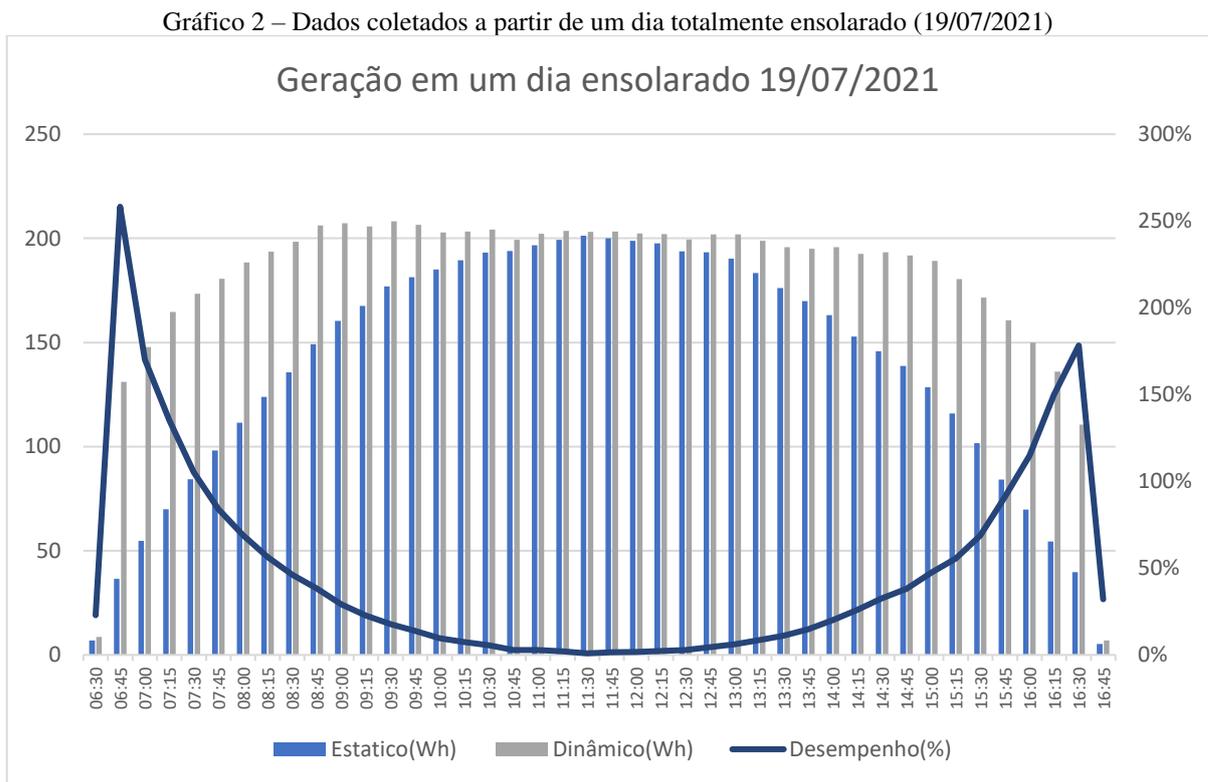
Onde: D se trata do desempenho entre as gerações considerando o gasto energético do seguidor solar, ou seja, a fórmula calcula a porcentagem de ganho do sistema móvel em relação ao sistema fixo (%), Pd representa a produção da energia do módulo dinâmico (Kwh), CCA é o consumo de energia do sistema de controle e atuador em 24 horas (Kwh) e Pe é a produção de energia do módulo Estático (Kwh).

Com base nas condições do clima e dos resultados, três dias específicos foram escolhidos para a análise, sendo esses dias classificados em: Ensolarado, Parcialmente Nublado² e Totalmente nublado, dito isso, ao final demonstra-se a geração total do período de coleta de dados(20 dias). Essas análises serão abordadas nos tópicos a seguir.

² Compreendido como um dia que apresenta passagens esporádicas de nuvens.

4.1.1 Dia Ensolarado

Os ensaios referentes à captação solar geralmente apresentam um gráfico cuja concavidade está voltada para baixo, dado que a radiação solar incidente sobre um módulo estático cresce entre o amanhecer ao meio dia aproximadamente, ou seja, até atingir seu zênite, e ao entrar pelo período da tarde começa a direcionar-se a Oeste até atingir o chamado pôr do sol, causando assim queda na radiação sobre o módulo. Mediante o exposto, com a implementação do seguidor solar é possível observar no gráfico 2 a atenuação das quedas de radiação incidente ou a aceleração do crescimento relativo aos valores energéticos captados, de forma que, o desempenho advindo da utilização do mesmo gera um gráfico inversamente proporcional ao de geração, uma vez que o seguidor solar favorece a geração nos percursos do amanhecer até o ponto de zênite e do zênite ao se pôr, esse fato é ilustrado no gráfico 2 abaixo, através de uma comparação pontual dos valores gerados em cada intervalo.



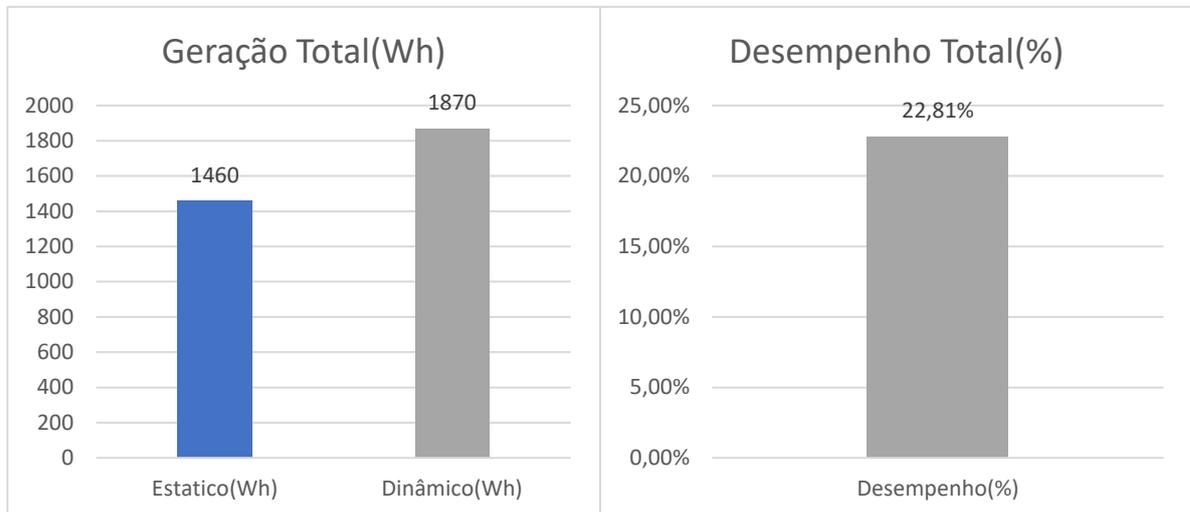
Fonte: Autor (2021).

O gráfico 2, foi desenvolvido levando em consideração dados de um ensaio realizado no dia 19/07/2021, demonstrados na Tabela 2, presente na **APÊNDICE C**, onde o dia foi totalmente ensolarado sem incidência de nuvens, a resultante de geração ao fim do dia foi de

1460Wh pelo módulo estático e 1870Wh pelo módulo dinâmico, que utiliza o seguidor solar. Considerando o consumo de energia do sistema de controle e atuador ao fim do ciclo de trabalho (77W), aplicando esses resultados à equação 3, o seguidor solar manifestou diferencial em desempenho referente à 22,81% em comparação ao módulo fixo.

Ao fim do ciclo total de operação (24h), o sistema de controle em conjunto com o atuador consumiu uma módica quantia de 77Wh, onde, por meio da aplicação da equação (3) teve como resultante um acréscimo relativo à 22,81% gerado pelo módulo dinâmico em relação ao módulo estático, ilustrado gráficos comparativos 3.a e 3.b abaixo:

Gráfico 3 – a. Comparativo de Geração de um dia totalmente ensolarado; b. Desempenho entre gerações. (19/07/2021)

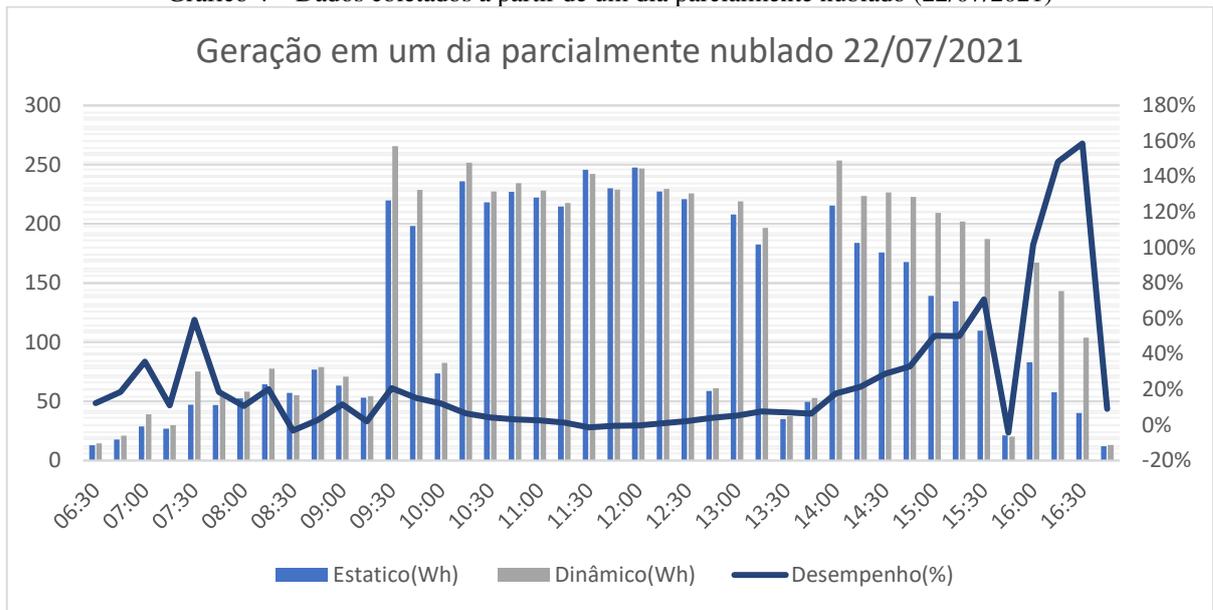


Fonte: Autor (2021).

4.1.2 Dia Parcialmente Nublado

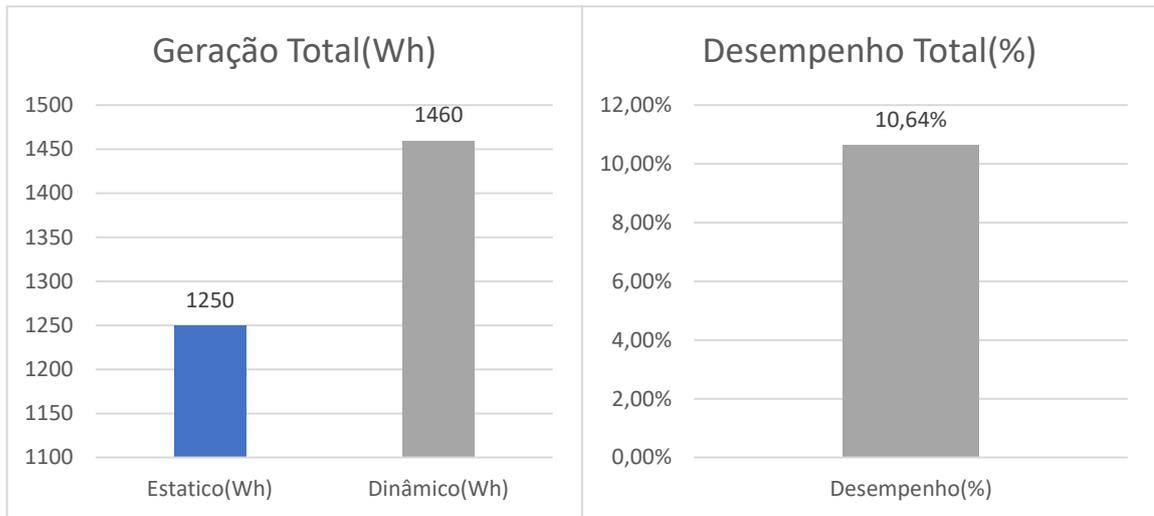
Relacionado ao dia parcialmente nublado, a geração, em contrapartida a um dia totalmente ensolarado torna-se composta por diversos “picos” de geração, que seriam os momentos onde há a incidência direta dos raios solares sobre os módulos, ou seja, é um dia composto de momentos de maximização da geração, esse fato é reforçado pelo Gráfico 4.

Gráfico 4 – Dados coletados a partir de um dia parcialmente nublado (22/07/2021)



Pode-se observar que as nuvens criam pontos de mínima geração devido a luz solar difusa, porém os picos de geração que ocorrem em dias como esse continuam por tentar acompanhar o crescimento da incidência solar, isso é demonstrado pela linha de desempenho, que apesar do aparecimento de variações ainda segue um padrão de concavidade virado para cima, a comparação de ambas as instalações dos módulos à estrutura, reforçam essa afirmação. O gráfico 4, foi desenvolvido baseado em dados de um ensaio realizado dia 22/07/2021 demonstrado na Tabela 3 presente na **APÊNDICE D**, onde o dia contou com a presença de nuvens, mas com intervalos de incidência solar momentânea, a resultante de geração ao fim do dia foi de 1250Wh pelo módulo estático e 1460Wh pelo módulo dinâmico que utiliza o seguidor solar. Ao fim do ciclo total de operação (24h) o sistema de controle em conjunto com o atuador continuou com o consumo módico de 77Wh, onde, através da aplicação da equação (3) teve como resultante um acréscimo relativo à 10,64% do gerado pelo módulo dinâmico em relação ao módulo estático. Essas relações são ilustradas nos gráficos 5. a e 5. b abaixo após aplicação da equação 3.

Gráfico 5 – a. Comparativo de Geração de um dia parcialmente nublado; b. Desempenho entre gerações. (22/07/2021)

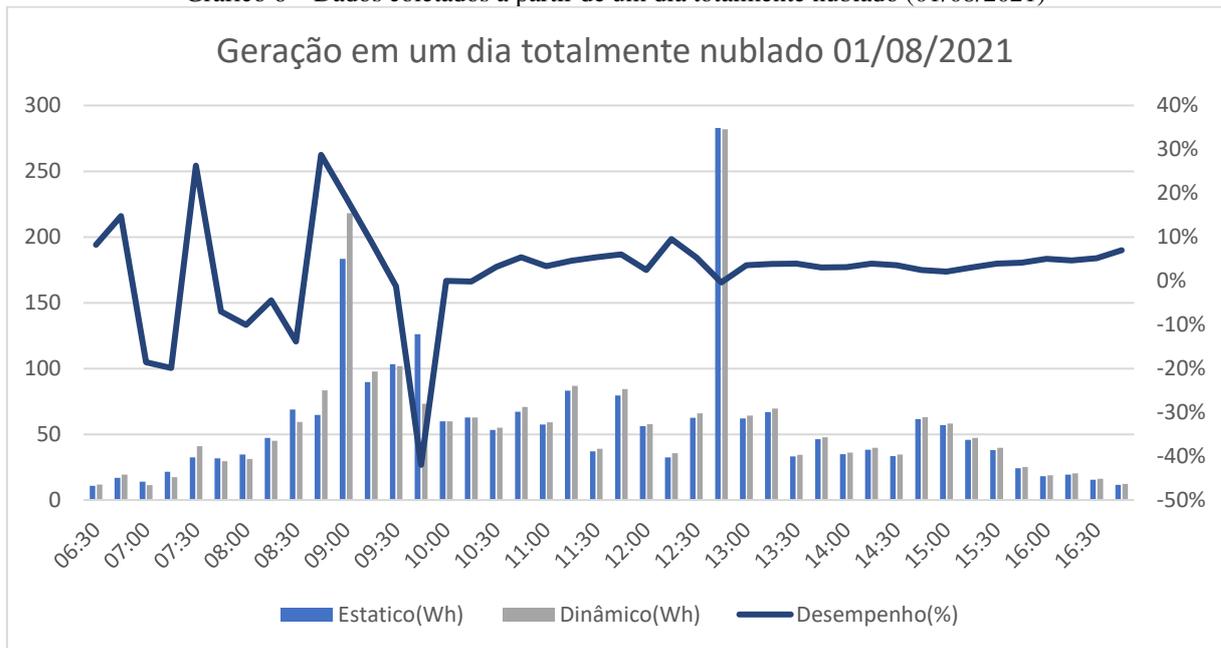


Fonte: Autor (2021).

4.1.3 Dia Nublado

A partir dos resultados anteriormente discutidos, evidencia-se a influência que a incidência de nuvens tem sobre a geração fotovoltaica, seja no modelo estático ou no dinâmico, as variações causadas pela presença de nuvens impactam fortemente sobre o desempenho da geração expressada pelos dados obtidos com os ensaios, dado que os raios solares difusos que atingem os módulos nesses casos, não garantem uma geração plena. O gráfico 6 abaixo ilustra a variação do desempenho e o comportamento da geração em um dia cujo clima foi totalmente nublado, onde é visível a queda no potencial gerado e a disformidade do desempenho, que, apesar de apresentar alguns picos, tende em certos momentos a igualar as duas gerações. Isso ocorre por conta da incidência solar difusa, que além de representar uma queda na geração, torna a incidência solar que recai sobre a área algo insuficiente para gerar diferenças, independentemente de sua orientação no momento.

Gráfico 6 – Dados coletados a partir de um dia totalmente nublado (01/08/2021)

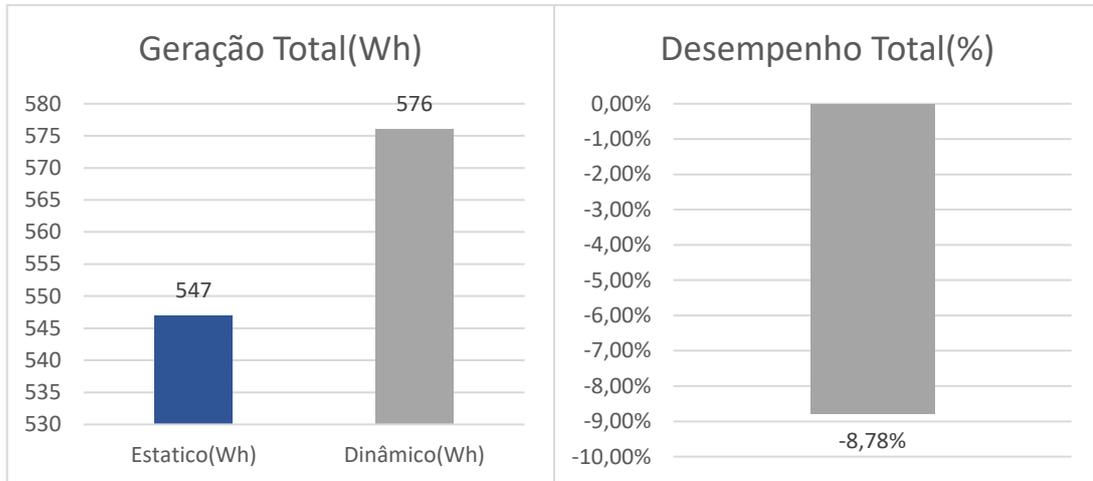


Fonte: Autor (2021).

É possível constatar no gráfico 6 que mesmo sob essas condições o módulo dinâmico conseguiu superar a geração do estático, porém dado o consumo do sistema como um todo a ser debitado dessa geração, mostrou-se ineficiente, dado que não havia incidência luminosa o bastante para ocasionar uma maior diferença entre a geração. Outro fato interessante que pode ser notado no gráfico desse dia é que, em um determinado momento do dia, a produção de energia das placas solares aumentou subitamente (12:45h), chegando próximo da potência de 280W em ambas as placas, observa-se ainda que essa potência superou, de forma pontual, a potência gerada nos outros dias de ensaio (Dia ensolarado e Dia parcialmente nublado). Esse fato pode ser explicado por dois motivos simples: primeiro, nesse momento o tempo abriu, permitindo a coleta plena da radiação solar pelos módulos e, segundo, as placas estavam “frias”, não sendo prejudicadas pelo efeito negativo da temperatura.

O gráfico 6, foi desenvolvido levando em consideração dados de um ensaio realizado dia 01/08/2021 demonstrado na Tabela 4 presente na **APÊNDICE E**, onde o dia foi totalmente nublado, a resultante de geração ao fim do dia foi de 547Wh pelo módulo estático e 576Wh pelo módulo dinâmico que utiliza o seguidor solar. Ao fim do ciclo total de operação (24h) o sistema de controle em conjunto com o atuador manteve seu consumo usual de 77Wh, onde, através da aplicação da equação (3) teve como resultante um total relativo à -8,77% do gerado pelo módulo dinâmico em relação ao módulo estático ilustrado nos gráficos 7.a e 7.b abaixo.

Gráfico 7 – a. Comparativo de Geração de um dia totalmente nublado; b. Desempenho entre gerações. (01/08/2021)

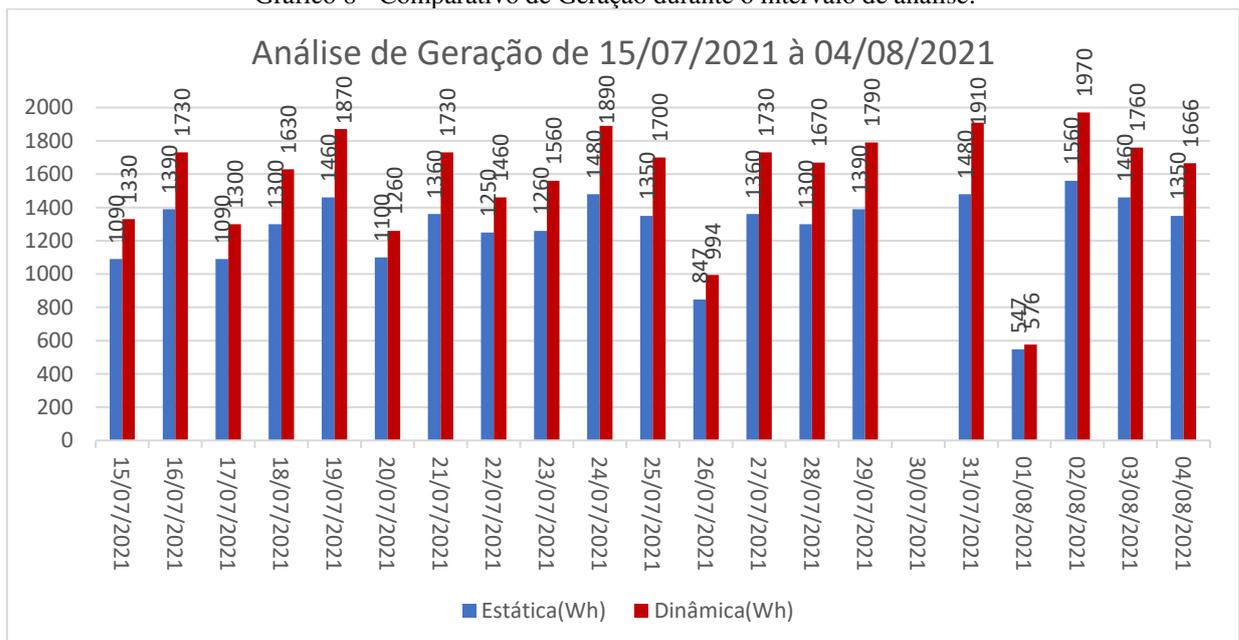


Fonte: Autor (2021).

4.1.4 Geração Total

O gráfico 8 a seguir, desenvolvido baseado na Tabela 5 presente na **APÊNDICE F** ilustra e compara as gerações analisadas no intervalo de 15/julho a 04/agosto, onde, neste período, o módulo fixo produziu 25.424Wh, enquanto o módulo do seguidor solar produziu 31.526Wh. Considerando o consumo energético total de todo o período de 20 dias (1540Wh), e aplicando a equação (3), o seguidor solar apresentou um desempenho médio de 17,94% (líquido) em relação ao instalado de forma convencional.

Gráfico 8 - Comparativo de Geração durante o intervalo de análise.



Fonte: Autor (2021).

5 CONCLUSÕES

Durante o período da coleta de dados e geração (15/julho a 04/agosto), o sistema rastreador solar funcionou de forma automatizada, não apresentando nenhuma falha elétrica ou mecânica. Com a pesquisa, observou-se que o seguidor solar apresenta diferentes desempenhos em função da condição climática, sendo o melhor aproveitamento em dias totalmente ensolarados e, apesar de uma visível redução na geração, para o dia parcialmente nublado também apresentou uma geração satisfatória. Além disso, é fato que o maior aproveitamento energético por parte do seguidor solar ocorre nas primeiras e nas últimas horas do dia, pois são nesses momentos em que há uma maior diferença em termos de ângulo entre o módulo fixo e o módulo do seguidor solar. Com relação ao dia totalmente nublado, observou-se pequenos atrasos na correção de posição do seguidor solar em relação aos raios do sol. Isso ocorreu devido à falta de diferenças significativas nas leituras analógicas dos sensores, que é compreendido como condição de equilíbrio, assim, fazendo com que o sistema de controle não tome nenhuma ação, ou seja, apenas mantém o seguidor parado. Além disso, observou-se que o desempenho do rastreador solar em comparação com o módulo fixo para essa condição climática foi negativo, isso devido ao gasto energético que o sistema utiliza para operar (77Wh/ciclo), juntamente ao fator de incidência solar ser muito baixo, dado que a difusão da luz solar imposta pela presença das nuvens torna irrelevante o acompanhamento. Pôde-se observar também que devido à movimentação realizada pelo seguidor solar, o módulo a ele acoplado apresentou um menor acúmulo de resíduos em comparação ao módulo fixo.

Levando em consideração os resultados adquiridos, dadas observações a respeito das características do sistema como um todo, elucida-se a possibilidade de melhorias para implementações no futuro, as quais compreendem:

- Para um dia totalmente nublado, podem ser conduzidos estudos com intuito de desenvolvimento de uma rotina de reconhecimento a fim de diferenciar essa condição climática e aplicar contramedidas de controle e/ ou reposicionar o módulo de forma a tentar corrigir e ou amenizar os efeitos dos mesmos sobre o equipamento.
- Otimização do sistema de alimentação do seguidor, no intuito de reduzir o consumo do sistema, e, conseqüentemente, aumentar a eficiência.
- Integração de um sistema wireless de comunicação para interação e acompanhamento do monitor serial em tempo real.

- Podem ser implementados estudos para quantificar as perdas e ganhos do seguidor solar em relação a limpeza dos módulos.
- Pode ser realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de comparar o ganho de produção energética do seguidor solar desenvolvido com outros existentes na literatura.
- Pode ser desenvolvida uma pesquisa de custo para uma análise de viabilidade monetária em relação ao desenvolvimento do seguidor solar.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, **geração distribuída**. 2018. Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 22, julho de 2021.
- BELTRÁN ADÁN, J. **Protótipo fotovoltaico con seguimiento del Sol para procesos electroquímicos**. 2007.
- BLANCO-MURIEL, Manuel et al. **Computing the solar vector**. *Solar energy*, v. 70, n. 5, p. 431-441, 2001.
- BRAGA, Renata Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. 2008.
- BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. **Colimador**. 2012. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/collimator>>. Acessado em 6 de outubro de 2021.
- BRITO, Miguel C.; SILVA, José A. **Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade**. Faculdade de ciências da Universidade de Lisboa, 2006.
- CARLESSO, Franciele et al. **Conceitos básicos de radiômetros de substituição elétrica para medidas da Irradiância Solar Total**. *Rev. Bras. Ensino Fís.*, São Paulo , v. 41, n. 2, e20180220, 2019 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000200418&lng=en&nrm=iso>. access on 23 Mar. 2021. Epub Jan 07, 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0220>.
- CARNEIRO, Joaquim AO. **Módulos fotovoltaicos: Características e associações**. 2010.
- CARNEIRO, Joaquim AO. **Semicondutores: modelo matemático da célula fotovoltaica**. 2010.
- CONNOR, Nick.; **O que é Band Gap – Gap de energia em semicondutores – Definição**. Disponível em:< <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-band-gap-gap-de-energia-em-semicondutores-definicao/>>, Acesso em: 06 de Outubro de 2021.
- CORTEZ, Ramiro José Monteiro et al. **Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**. 2013.

CY Lee, C Chou , CM Chiang , CF Lin . **Sistemas de rastreamento da Sun: uma revisão Sensores** , 9 (2009) , pp. 3875 - 3890. Disponível em : <https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Sun%20tracking%20systems%3A%20a%20review&publication_year=2009&author=C.Y.%20Lee&author=P.C.%20Chou&author=C.M.%20Chiang&author=C.F.%20Lin>

DEMANBORO, Antônio Carlos, MARIOTONI, Carlos Alberto, NATURESA, Jim Silva *et al.* **A sustentabilidade através de empreendimentos energéticos descentralizados.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Proceedings online...** Available from: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100003&lng=en&nrm=abn>. Access on: 22 Mar. 2021.

Demo files & maps. Meteonorm, 2015. Disponível em: <<https://meteonorm.com/en/demo-files-maps>>. Acesso em: 19, maio de 2021.

ENERGIAS MADEIRA. **Estruturas de suporte para fixação de painéis fotovoltaicos**, 2021. Disponível em: <<https://energiasmadeira.pt/como-funciona/#Estrutura/>>. Acesso em: 23 de Julho de 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Síntese do Balanço Energético Nacional 2021 - BEN 2021 , ano base 2020**, Rio de Janeiro, 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: 14 Março. 2021.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética): **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.** Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em:<https://www.vario.com.br/VarioECP/arquivos/Downloads/NT_EnergiaSolar_2012_EPE.pdf>

GÓMEZ, J. M. et al. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, 2018.

H. Mousazadeh , A. Keyhani , A. Javadi , H. Mobli , K. Abrinia , A. Sharifi. **Uma revisão dos princípios e métodos de rastreamento do sol para maximizar a produção de sistemas**

solares. Renew Sustain Energy Rev , 13 (2009) , pp. 1800 - 1818. Disponível em :<
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109000318>>

HOYMILES. **Micro-inversor, Manual do usuário.** Versão 2.0, Junho de 2020. Disponível em
: https://genyx.com.br/novo-site/wp-content/uploads/2021/04/MI-1000___1200--1500_User-Manual.pdf

JÚNIOR, Santos et al. **Análise de materiais e técnicas de encapsulamento de módulos fotovoltaicos.** 2008.

JURINIC, Francesco. **Estudo para melhoria na performance e eficiência de placas fotovoltaicas: através de um sistema combinado de inclinação e resfriamento.** Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, 2020.

KALOGIROU, Soteris. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas.** Elsevier Brasil, 2016.

KHAN, Sadeque Reza; KABIR, Alvir; HOSSAIN, Dilshad Ara. **Designing smart multipurpose digital clock using real time clock (RTC) and PIC microcontroller.** International Journal of Computer Applications, v. 41, n. 9, p. 40-42, 2012.

MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S. **Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão.** Revista virtual de química, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

MELLO, Hilton A.; BIASI, Ronaldo S. **Introdução à Física dos semicondutores.** Editora Edgard Blucher. São Paulo, 1975.

NASCIMENTO, Adriana de Souza et al. **Energia solar fotovoltaica: estudo e viabilidade no nordeste brasileiro.** 2015

NASCIMENTO, Bruno André Marques. **Algoritmo de posicionamento e backtracking para seguidor solar.** 2015. Tese de Doutorado.

NEVES, Guilherme Marques. **Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais–INPE, 2016.

NREL. **Glossary of solar radiation resource terms: National Renewable Energy Laboratory.** 2017. Disponível em. Acesso em março 2021.

OCAENERGIA, **sistema fotovoltaico híbrido: entenda o que é e suas aplicações**. 2021. Disponível em: < <https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/sistema-fotovoltaico-hibrido-entenda-o-que-e/>>. Acesso em: 23, julho de 2021.

OLIVEIRA, Kleber Carneiro de. **Avaliação da conversão da energia fotovoltaica em sistemas isolados**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

OLIVEIRA, M. M.. **Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal**. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, setembro de 2008

OLIVEIRA, **Maurício Madeira**. **Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal**. 2008.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-499, 2014.

PINTO, Aimé et al. **Descrição De Seguidores Solares E Sua Aplicação Em Centrais Fotovoltaicas Conectadas À Rede**. In: III Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, Pará. 2010.

SANJUAN, Berti. **Desenvolvimento de um rastreador solar para placas fotovoltaicas**. UNIVASF, Juazeiro, Bahia, 2013.

SARAIVA, Maria de Fátima O. Saraiva. **Movimento anual do Sol**. UFRGS, 2016. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/fis2016/aulas/mov_anual_sol.htm>. Acesso em: 30 de março, 2021.

SISTEMA SOLAR ON-GRID E OFF-GRID. Solar Martins, S.d. Disponível em: <<https://solarmartins.com.br/sistema-solar-on-grid-e-off-grid/>>. Acesso em: 23, julho de 2021.

SONNEMAKER, João Baptista Sonnemaker. **METEOROLOGIA APLICADA: OS MOVIMENTOS DA TERRA E AS ESTAÇÕES DO ANO**. Hangar33, 2012. Disponível em: <<http://blog.hangar33.com.br/meteorologia-aplicada-os-movimentos-da-terra-e-as-estacoes-do-ano/>>. Acesso em: 24, março de 2021.

TUDO SOBRE A EFICIÊNCIA DO PAINEL SOLAR. Portal Solar, S.d. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-eficiencia-do-painel-solar.html> >. Acesso em: 23, abril de 2021.

VALCACER, S. M. et al. **Uso de Sistemas Automatizados para Otimizar a captação de Energia em Painéis Solares**. Blucher Mathematical Proceedings, v. 1, n. 1, p. 12-19, 2015.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael, **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados do ensaio comportamental de variação luminosa durante o curso diário do sol

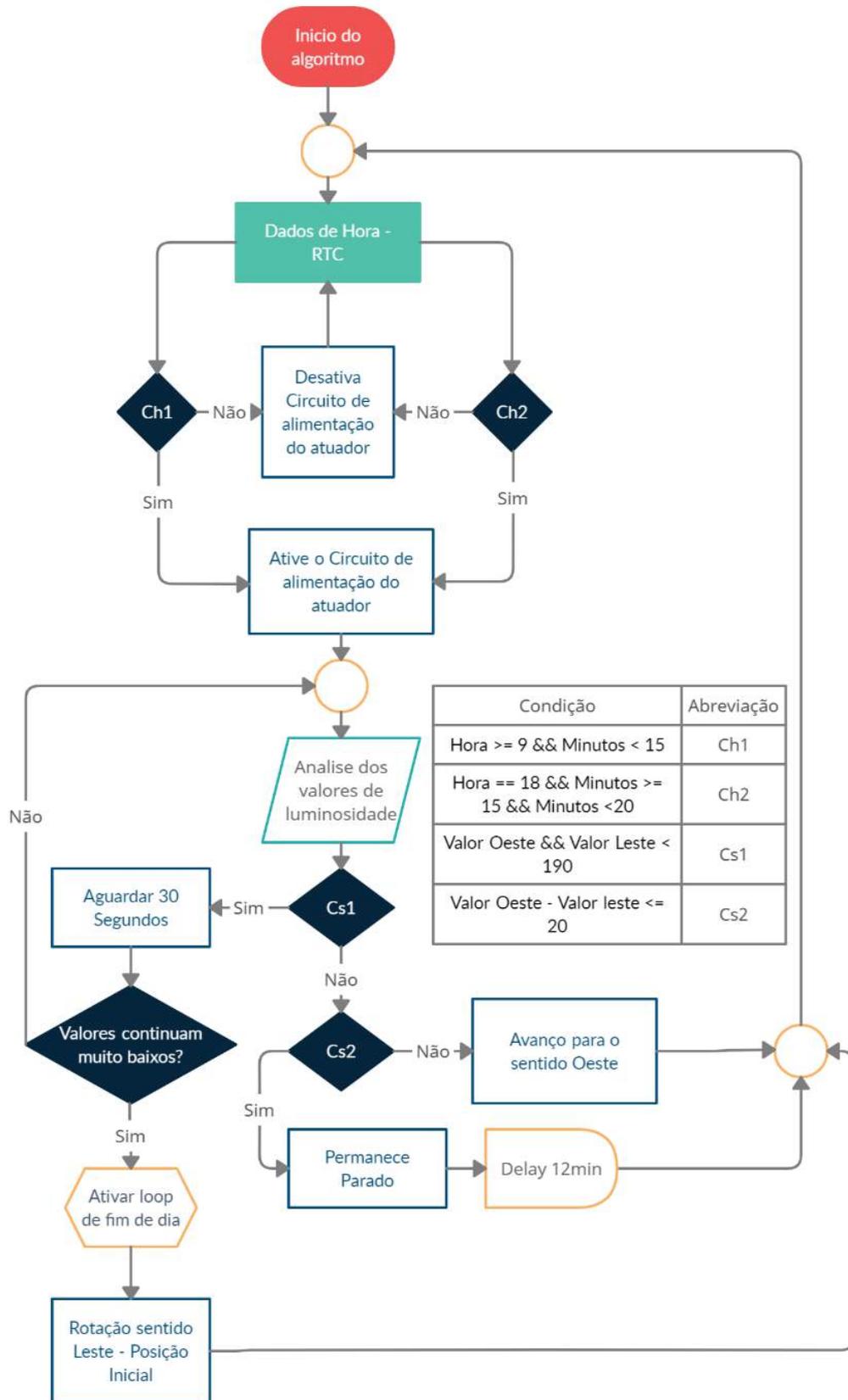
Tabela 1 - Ensaio comportamental de variação luminosa do curso diário do sol

Medias			
Leste	Oeste	Hora	Intervalo
809	767	10	10~19
826	768	10	20~29
848	761	10	30~39
869	744	10	40~49
832	747	10	50~59
836	819	11	0~9
867	832	11	10~19
867	852	11	20~29
823	814	11	30~39
851	845	11	40~49
773	791	11	50~59
708	723	12	0~9
745	769	12	10~19
755	848	12	20~29
717	857	12	30~39
668	862	12	40~49
733	835	12	50~59
657	803	13	0~9
613	848	13	10~19
628	841	13	20~29
618	829	13	30~39
709	835	13	40~49
675	798	13	50~59
714	789	14	0~9

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE B – Fluxograma lógico do sistema *Tracker*.

Figura 34 – Esquema de funcionamento do sensor seguidor solar



Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE C – Dados do ensaio realizado dia 19/07/2021

Tabela 2 - Análise de geração dia 19/07
Ciclo de Desempenho Diário 19/07

Módulos			
Estático(W)	Dinâmico(W)	Hora	Desempenho(%)
7	8,6	06:30	23%
36,6	131,1	06:45	258%
54,7	147,8	07:00	170%
70	164,6	07:15	135%
84,4	173,3	07:30	105%
98,1	180,5	07:45	84%
111,5	188,4	08:00	69%
123,9	193,6	08:15	56%
135,7	198,4	08:30	46%
149,1	206,2	08:45	38%
160,4	207,2	09:00	29%
167,6	205,7	09:15	23%
176,9	208,1	09:30	18%
181,3	206,4	09:45	14%
185	202,8	10:00	10%
189,4	203,3	10:15	7%
193,2	204,1	10:30	6%
193,9	199,3	10:45	3%
196,6	202,2	11:00	3%
199,3	203,6	11:15	2%
201,3	203,1	11:30	1%
200	203,2	11:45	2%
198,8	202,3	12:00	2%
197,6	202,1	12:15	2%
193,8	199,4	12:30	3%
193,3	201,9	12:45	4%
190,3	201,9	13:00	6%
183,3	198,8	13:15	8%
176,1	195,7	13:30	11%
169,8	195	13:45	15%
163,1	195,8	14:00	20%
152,8	192,5	14:15	26%
145,8	193,3	14:30	33%
138,7	191,7	14:45	38%
128,4	189,2	15:00	47%
115,9	180,4	15:15	56%
101,6	171,5	15:30	69%
84,2	160,7	15:45	91%
69,8	149,9	16:00	115%

54,4	136	16:15	150%
39,7	110,5	16:30	178%
5,3	7	16:45	32%
Geração Total(Wh)		Desempenho Total(%)	
1460	1870	22,81%	

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE D – Dados do ensaio realizado dia 22/07/2021

Tabela 3 - Análise de geração dia 22/07
Ciclo de Desempenho Diário 22/07

Módulos			
Estático(W)	Dinâmico(W)	Hora	Desempenho(%)
12,9	14,5	06:30	12%
17,7	21	06:45	19%
28,8	39,1	07:00	36%
27	30	07:15	11%
47,2	75,2	07:30	59%
46,8	55,5	07:45	19%
52,6	58,2	08:00	11%
64,5	77,6	08:15	20%
57	55,2	08:30	-3%
76,7	78,9	08:45	3%
63,4	70,8	09:00	12%
53,2	54,3	09:15	2%
219,9	265,7	09:30	21%
198,3	228,6	09:45	15%
73,6	82,6	10:00	12%
236	251,5	10:15	7%
218,1	227,3	10:30	4%
227,2	234,4	10:45	3%
222,2	228,1	11:00	3%
214,7	217,5	11:15	1%
245,8	242,3	11:30	-1%
230,1	228,9	11:45	-1%
247,5	246,9	12:00	0%
227,3	229,5	12:15	1%
220,8	225,8	12:30	2%
58,7	61,1	12:45	4%
208	218,9	13:00	5%
182,5	196,5	13:15	8%
35	37,5	13:30	7%
49,6	52,8	13:45	6%
215,4	253,5	14:00	18%
184	223,5	14:15	21%
175,7	226,5	14:30	29%
167,6	222,8	14:45	33%
139,2	209,2	15:00	50%
134,5	201,9	15:15	50%
109,6	187,1	15:30	71%
21,2	20,3	15:45	-4%
82,9	167,1	16:00	102%
57,7	143,3	16:15	148%

40,1	103,7	16:30	159%
12,1	13,2	16:45	9%
Geração Total(Wh)		Desempenho Total(%)	
1250	1460	10,64%	

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE E – Dados do ensaio realizado dia 01/08/2021

Tabela 4 - Análise de geração dia 01/08
Ciclo de Desempenho Diário 01/08

Módulos			
Estático(W)	Dinâmico(W)	Hora	Desempenho(%)
10,9	11,8	06:30	8%
16,9	19,4	06:45	15%
14	11,4	07:00	-19%
21,6	17,3	07:15	-20%
32,3	40,8	07:30	26%
31,6	29,4	07:45	-7%
34,7	31,2	08:00	-10%
47,1	45	08:15	-4%
68,8	59,3	08:30	-14%
64,7	83,3	08:45	29%
183,4	218,1	09:00	19%
89,6	97,6	09:15	9%
103,2	101,9	09:30	-1%
126	73,1	09:45	-42%
59,9	59,9	10:00	0%
62,8	62,7	10:15	0%
53,2	54,9	10:30	3%
67,1	70,7	10:45	5%
57,3	59,2	11:00	3%
83,1	86,9	11:15	5%
37	39	11:30	5%
79,6	84,4	11:45	6%
56,3	57,7	12:00	2%
32,5	35,6	12:15	10%
62,5	65,8	12:30	5%
283	281,9	12:45	0%
62	64,2	13:00	4%
66,9	69,5	13:15	4%
33,1	34,4	13:30	4%
46,2	47,6	13:45	3%
34,9	36	14:00	3%
38,2	39,7	14:15	4%
33,5	34,7	14:30	4%
61,6	63,1	14:45	2%
56,9	58,1	15:00	2%
45,8	47,2	15:15	3%
38,1	39,6	15:30	4%
24,1	25,1	15:45	4%
18	18,9	16:00	5%
19,4	20,3	16:15	5%

15,4	16,2	16:30	5%
11,5	12,3	16:45	7%
Geração Total(Wh)		Desempenho Total(%)	
547	576	-8,78%	

Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE F – Dados coletados para a quantificação e análise de geração solar no intervalo definido de 20 dias

Tabela 5 - Análise de Geração total; Coleta de dados condicionais
Análise de Geração

Data	Coleta		Consumo por ciclo(Wh)
	Estática(Wh)	Dinâmica(Wh)	
15/07/2021	1090	1330	77
16/07/2021	1390	1730	77
17/07/2021	1090	1300	77
18/07/2021	1300	1630	77
19/07/2021	1460	1870	77
20/07/2021	1100	1260	77
21/07/2021	1360	1730	77
22/07/2021	1250	1460	77
23/07/2021	1260	1560	77
24/07/2021	1480	1890	77
25/07/2021	1350	1700	77
26/07/2021	847	994	77
27/07/2021	1360	1730	77
28/07/2021	1300	1670	77
29/07/2021	1390	1790	77
31/07/2021	1480	1910	77
01/08/2021	547	576	77
02/08/2021	1560	1970	77
03/08/2021	1460	1760	77
04/08/2021	1350	1666	77

Fonte: Autor (2021).

Documento Digitalizado Restrito

Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto: Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por: William Germano
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Restrito
Hipótese Legal: Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **William Germano de Abreu, ALUNO (2016110110253) DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL - CAJAZEIRAS**, em 28/10/2021 12:59:01.

Este documento foi armazenado no SUAP em 28/10/2021. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 360216
Código de Autenticação: 674f1318fe

