

DIEGO BERWANGER

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM
RASTREADOR SOLAR DE UM EIXO INSTALADO EM UMA
PROPRIEDADE RURAL CONECTADO À REDE

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2019

DIEGO BERWANGER

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM
RASTREADOR SOLAR DE UM EIXO INSTALADO EM UMA
PROPRIEDADE RURAL CONECTADO À REDE**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Professor Orientador: Dr. Armin Feiden.
Professor Coorientador: Jair Antônio Cruz Siqueira

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2019

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Berwanger, Diego

Desenvolvimento de um sistema fotovoltaico com rastreador solar de um eixo instalado em uma propriedade rural conectada à rede / Diego Berwanger; orientador(a), Armin Feiden; coorientador(a), Jair Antônio Cruz Siqueira, 2019.

79 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2019.

1. Energia Solar Fotovoltaica. 2. Eficiência Energética. 3. Seguidor Solar. 4. Solar Tracker. I. Feiden, Armin . II. Siqueira, Jair Antônio Cruz. III. Título.

DIEGO BERWANGER

Desenvolvimento de um sistema fotovoltaico com rastreador solar de um eixo instalado em uma propriedade rural conectado à rede

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Jair Antonio Cruz Siqueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Maritane Prior

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Carlos Roberto Moreira

Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG)

Cascavel, 21 de março de 2019

*Dedico aos professores que não medem esforços para formar pessoas melhores
para o mundo.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais que sempre me incentivaram a buscar o conhecimento. Agradeço também a todos os professores que cruzaram o meu caminho até este momento, em especial ao meu Orientador e Coorientador pela grande contribuição neste trabalho.

Agradeço também aos familiares e amigos que estiveram dispostos a ajudar.

Às instituições de minha formação que tiveram sua devida importância durante cada etapa.

Aos professores e funcionários do programa que se dedicaram para sua criação e aos que se dedicam em sua manutenção.

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram positivamente para que este momento fosse possível.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes da radiação solar.	4
Figura 2 – Irradiação média no plano horizontal no Brasil entre 1999 a 2015.....	5
Figura 3 – Sistema Fotovoltaico conectado à rede elétrica.	8
Figura 4 – Sistema Fotovoltaico isolado.....	9
Figura 5- Eficiência das diferentes células fotovoltaicas.	11
Figura 6 - Célula de silício monocristalino.	12
Figura 7- Célula de silício policristalino.	13
Figura 8 – Painel de silício amorfo.	14
Figura 9 - Célula de Telureto de Cádmio (CdTe).	14
Figura 10- Efeito do aumento da temperatura na célula FV.	16
Figura 11 - Sombreamento em módulo fotovoltaico instalado em telhado.	17
Figura 12 – Ângulo de incidência solar.....	19
Figura 13 - Sistema de rastreamento solar de um eixo	22
Figura 14 - Sistema de Rastreamento solar de dois eixos.	23
Figura 15 – Local de realização do experimento.....	25
Figura 16 – Irradiação Solar no Plano Horizontal em Cascavel PR.	26
Figura 17– Irradiação Solar no Plano Inclinado em Cascavel PR.	26
Figura 18 – Painel Solar GCL SOLAR, modelo GCL-P6/60275, potência 275W.	28
Figura 19 – Microinversor, fabricante Northern Electric (NEP), modelo BDM-300X2- EU-D.....	29
Figura 20 – Medidor de Energia, fabricante ITEAD SONOFF, modelo POW R2.	30
Figura 21 – Vista Isométrica da Estrutura Fixa, modelada em software computacional.	31
Figura 22 – Vista Lateral da Estrutura Fixa, modelada em software computacional.	31
Figura 23 – Vista Isométrica Rastreador Solar de Um Eixo, modelado em software computacional.	32
Figura 24 – Rastreador Solar de Um Eixo Renderizado.	33
Figura 25 – Atuador Linear de Fuso Trapezoidal, com Redução e Motor Monofásico, fabricante PPA.	33

Figura 26 – Temporizador Digital, fabricante EXATRON.....	34
Figura 27– Quadro Elétrico de Comando e de Força, fabricante Opção Painéis.	35
Figura 28 – Montagem das Estruturas para Sistemas Fotovoltaicos Fixo e Móvel...	36
Figura 29 – Instalação das Estruturas no Local do Experimento.....	37
Figura 30 – Diagrama Unifilar do Projeto Elétrico Fotovoltaico.....	38
Figura 31 – Fixação do Microinversor na Estrutura.	39
Figura 32 – Fixação dos Painéis Fotovoltaicos na Estrutura de Um Eixo.....	40
Figura 33 - Fixação dos Painéis Fotovoltaicos na Estrutura Fixa.	40
Figura 34 – Instalação do Quadro Elétrico na Estrutura Fixa.	41
Figura 35 – Telas de Monitoramento do Aplicativo <i>EWELINK</i>	41
Figura 36 – Protótipo Sistema Fotovoltaico Fixo, com ajuste de inclinação de 0 a 30°.	42
Figura 37 - Protótipo modelado computacionalmente em <i>software SOLIDWORKS</i> . 43	
Figura 38 - Protótipo para Sistema Fotovoltaico de Um Eixo	44
Figura 39 – Sequência de Movimentação do Sistema Fotovoltaico com Rastreador de Um Eixo.	47
Figura 40 – Motor monofásico com caixa de redução de 1:23 acoplado ao fuso trapezoidal.	48
Figura 41 – Geração de Energia no Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar	50
Figura 42 Geração de Energia no Sistema Fotovoltaico Fixo.....	51
Figura 43 – Comparação Energia Gerada em Sistema Fotovoltaico com Rastreador e Fixo.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Irradiação Solar Média no Plano Horizontal e Inclinado em Cascavel PR	26
Tabela 2. Dados Técnicos do Módulo GCL SOLAR, modelo GCL-P6/60275	28
Tabela 3. Especificações Técnicas do Microinversor NEP	29
Tabela 4. Especificações Técnicas do Medidor de Energia, fabricante ITEAD SONOFF	30
Tabela 5. Especificações Técnicas do Atuador Linear de Fuso Trapezoidal	34
Tabela 6. Dados Técnicos do Temporizador Digital, fabricante Exatron, modelo TMDS0BC	35

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício amorfo
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CdTe	Telureto de Cádmio
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Sálvio Brito
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaico
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
I _{sc}	<i>Short circuit current</i> (corrente de curto circuito)
m-Si	Silício monocristalino
p-Si	Silício policristalino
SFVI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica
STC	<i>Standart Test Conditions</i> (condições padrão de ensaio)
OPV	<i>Organic Photovoltaic</i> (células fotovoltaicas orgânicas)
VOC	<i>Open circuit voltage</i> (tensão de circuito aberto)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
μc-Si	Silício microcristalino

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
G	Irradiância solar
GALB	Albedo
Gcs	Constante solar
GDIF	Irradiância difusa
GDIR	Irradiância direta
GHOR	Irradiância global
GTOT	Irradiância total
J m ⁻²	Joule por metro quadrado
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
KWh m ⁻²	Quilowatt-hora por metro quadrado
m ²	Metro quadrado
O ³	Ozônio
W	Watt
Wh	Watt-hora
W m ⁻²	Watt por metro quadrado
Wh m ⁻²	Watt-hora por metro quadrado
Wp	Watt-pico

BERWANGER, Diego. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2019. **Desenvolvimento de um Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar de um eixo instalado em uma propriedade rural conectado à Rede.** Professor Orientador Dr. Armin Feiden. Professor Coorientador Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira.

A maior parte da energia produzida no mundo vem de fontes de energia não renováveis, como gás natural, carvão mineral e óleo diesel. No entanto, estas fontes liberam gases de efeito estufa na atmosfera como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e outros gases em menor quantidade. Uma alternativa é a utilização de fontes renováveis de energia, como a energia solar fotovoltaica. A grande vantagem na utilização da energia solar é a produção de energia elétrica diretamente a partir da luz do sol, sem emissão de gases poluentes, pois converte a irradiação solar em energia elétrica, que pode ser utilizada diretamente ou armazenada para uso posterior. Os sistemas fotovoltaicos podem ser otimizados por meio da utilização de rastreador solar, visto que quanto mais perpendicular a luz do sol atingir a superfície do painel, maior será sua potência e, por consequência, a geração de energia sofrerá aumento. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um Sistema Fotovoltaico (SFV) com Rastreador Solar de Um Eixo, modelar computacionalmente e realizar avaliação comparativa entre a geração de energia em SFV com Rastreador e SFV Fixo. Após desenvolver o protótipo virtual, o SFV com Rastreador Solar de Um Eixo foi fabricado e instalado em uma propriedade rural. Ambos os sistemas fotovoltaicos foram conectados à rede da distribuidora de energia local, por meio de geração distribuída. Foram coletados os dados de geração de energia dos Sistemas Fotovoltaicos durante 21 dias por meio de medidores de energia com transmissão sem fio. O fornecimento de energia no sistema fotovoltaico sem rastreador solar obteve uma geração de 21,84 kWh já o sistema fotovoltaico com rastreador solar chegou a 42 kWh de produção de energia. A utilização de sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar apresenta melhor custo-benefício, pois fornece valores de energia superiores em comparativo à sistemas sem o uso do rastreador solar.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar fotovoltaica, eficiência energética, seguidor solar.

BERWANGER, Diego. State University of West Paraná, March 2019. **Design of solar tracker and energetic evaluation of photovoltaic systems.** Advisor Dr. Armin Feiden. Co-advisor Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira.

ABSTRACT

Currently, most of the energy produced in the world have non-renewable energy sources such as natural gas, coal, diesel or oil. However, these sources release green gases into the atmosphere as carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO) and other gases in smaller quantities. An alternative is the use of renewable energy sources, such as photovoltaic solar energy. The great advantage in the use of solar energy is the production of electricity directly from sunlight with no emission of polluting gases, because it converts solar irradiation into electric energy, which can be used directly or stored for later use. Photovoltaic systems can be optimized through the use of solar tracker, since the more perpendicular the sun light achieves the panel surface, the greater its power and, consequently, the energy generation will increase. The main goal of this work was to design a photovoltaic solar system (SFV) with a tracker of one axis, design the SFV in CAD and evaluate the energy generation in SFV with solar tracker and fixed SFV. After develop the virtual prototype, the SFV system with solar tracker was assembled and installed in a rural property. Both SFV systems were connected to the local power distributor's electrical grid as On-Grid systems. It was collected 21 days of energy generation data from the photovoltaic systems through energy meters with wireless transmission. The photovoltaic system without solar tracker obtained 21.84 kWh of generation, while the photovoltaic system with solar tracker reached 42 kWh of energy production. The use of solar tracking systems has a better cost-benefit because provides higher energy values compared to the system without the use of solar tracker.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Financial Code 001.

KEYWORDS: Photovoltaic solar energy, energy efficiency, solar tracker.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Radiação solar	3
2.2. Energia solar fotovoltaica	6
2.2.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR).....	8
2.2.2 Sistemas fotovoltaicos isolados (SFVI)	9
2.3. Célula fotovoltaica.....	10
2.3.1 Tipos de células	12
2.4. Fatores de perdas	15
2.4.1. Temperatura.....	15
2.4.2. Sombreamento.....	16
2.4.3. Perdas no inversor	17
2.4.4. Ângulo de incidência solar ou de inclinação.....	18
2.5. Parâmetros para avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos.....	19
2.6. Rastreador solar.....	20
2.6.1. Sistema de rastreamento de um eixo.....	22
2.6.2 Sistema de rastreamento de dois eixos	22
2.6.3 Sistema de rastreamento com controle em malha aberta.....	23
2.6.4. Sistema de rastreamento com controle em malha fechada.....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. Caracterização do experimento.....	25
3.2. Especificações técnicas dos materiais utilizados	27
3.2.1 Painel solar fotovoltaico (módulo)	27
3.2.2 Microinversor Solar	28
3.2.3 Medidor de Energia	29
3.2.4 Estrutura Fixa em Inclinação Igual a Latitude.....	30
3.2.5 Estrutura de Rastreador Solar em Um Eixo	32
3.2.6 Atuador Linear de Fuso Trapezoidal	33
3.2.7 Temporizador Digital	34
3.2.8 Quadro Elétrico	35
3.3. Caracterização dos métodos.....	36

3.3.1	Fabricação e Instalação do Sistema Fotovoltaico Fixo e de Um Eixo.....	36
3.3.2	Projeto Elétrico do Sistema Fotovoltaico Fixo e de Um Eixo	37
3.3.3	Instalação dos Painéis e Instalação Elétrica.....	38
3.3.4	Monitoramento e Registro da Produção de Energia	41
3.3.5	Avaliação do Sistema Fotovoltaico Fixo	42
3.3.6	Avaliação do Sistema Fotovoltaico de Um Eixo	43
3.3.7	Apresentação dos Dados e Formas de Análise.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1.	Avaliação do Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar em Um Eixo	46
4.2.	Avaliação Comparativa dos Dados de Geração dos Sistemas Fotovoltaicos .	48
4.3.	Avaliação do Desempenho do Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar Comparativamente ao Sistema Fotovoltaico Fixo.....	50
4.4.	Avaliação da Energia Consumida pelo Motor do Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar.....	53
4.5.	Avaliação de Geração.....	53
5.	CONCLUSÕES	55
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

Em 2016, aproximadamente 67,3% do total de energia elétrica produzida no mundo foi por meio de derivados do petróleo, carvão, gás natural e biocombustíveis, de acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2016).

Atualmente, a maior parte da energia produzida no mundo vem de fontes de energias não renováveis que necessitam sofrer combustão para se transformarem em energia útil, como em um motor à combustão interna, em uma usina termelétrica ou mesmo em uma caldeira para aquecimento de água.

Esse processo de combustão libera gases como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e outros gases em menor quantidade, que afetam o ar atmosférico, o solo e os recursos hídricos, contribuindo acentuadamente para o aumento do efeito estufa. As mudanças climáticas decorrentes das emissões dos gases de efeito estufa apontam uma crise ambiental em escala planetária sem precedentes (BERMANN, 2008).

Uma solução para esses problemas é a exploração de fontes renováveis de energia, por meio do desenvolvimento sustentável, colaborando para reduzir os impactos socioambientais negativos relacionados com a poluição do solo, do ar e de recursos hídricos (BERMANN, 2008).

A grande vantagem na utilização das energias renováveis é a não emissão de gases poluentes, visto que são energias limpas e sustentáveis, além de provocar impacto ambiental muito baixo ou mesmo nulo.

Com o intuito de reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis, o Brasil vem atualizando e adequando sua matriz energética, permitindo a produção e geração de fontes alternativas de energias renováveis (BEZERRA, 2016).

No Brasil, o consumo crescente e o impacto ambiental e social causados pelas fontes de energias tradicionais levaram o governo e a sociedade a pensarem em novas alternativas para a geração de energia elétrica (BERMANN, 2008).

Em especial, a energia solar fotovoltaica vem assumindo um papel de destaque como uma alternativa para geração de energia elétrica de maneira sustentável no país, apresentando um crescimento exponencial nos últimos anos.

Este trabalho teve como objetivo geral desenvolver um sistema fotovoltaico fixo e um sistema fotovoltaico com rastreador em um eixo (dispositivo que mantém e controla o posicionamento do painel solar de forma que a incidência dos raios solares seja perpendicular à superfície dos módulos fotovoltaicos). Possui como objetivo comparar a eficiência energética em um sistema fotovoltaico fixo com inclinação igual a latitude do local e um sistema fotovoltaico com rastreador em um eixo.

Em meio aos objetivos específicos é possível evidenciar o desenvolver (com modelagem computacional) e executar a montagem de um seguidor solar em um eixo com algoritmo de posicionamento em malha aberta, assim como implementar dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede da concessionária local (Geração Distribuída com fonte fotovoltaica), sendo um Sistema Fotovoltaico Fixo e outro Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar em Um Eixo. Outro objetivo específico foi mensurar a geração de energia em cada sistema fotovoltaico, avaliar o consumo do motor do rastreador e realizar a avaliação de viabilidade técnica e de benefício-custo utilizando estas duas diferentes tecnologias de geração de energia elétrica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Radiação solar

A radiação solar é a energia emitida no espaço interplanetário gerada no núcleo do sol por meio de reações de fusão termonuclear que produzem radiação eletromagnética em várias frequências e comprimentos de onda. Por conseguinte, a energia solar resulta do processo dessa fusão que ocorre no Sol e atinge a superfície da Terra.

O Sol é a estrela mais próxima da Terra, e sua energia radiante é praticamente a única fonte de energia que influencia os movimentos atmosféricos em nosso clima. O Sol é um corpo completamente gasoso composto principalmente de hidrogênio (IQBAL, 1983).

A radiação solar é a energia advinda do Sol, por meio da propagação de ondas eletromagnéticas, consideradas a fonte primária de energia no planeta. Luz visível e infravermelha atingem a superfície, aquecendo as condições habitáveis (NASA, 2018).

A radiação solar é a principal fonte de energia na maioria das interações superfície-atmosfera que conduzem quase todos os processos físicos, químicos e biológicos nos sistemas atmosféricos e oceânicos da Terra (MARQUES FILHO et al, 2016).

A fim de padronizar as terminologias sobre energia solar fotovoltaica, foi desenvolvida a NBR 10899, em 2006, e em 2013 ocorreu o primeiro projeto de revisão. A seguir, apresentam-se algumas definições importantes que foram utilizadas ao longo deste projeto de pesquisa, de acordo com as normas da ABNT:

Radiação solar: Forma de transferência de energia advinda do sol, por meio da propagação de ondas eletromagnéticas (ou fótons);

Irradiância solar (G): Taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watt por metro quadrado (W/m^2);

Irradiação solar: Irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia, medida em watt hora por metro quadrado (Wh/m^2) ou Joule por metro quadrado (J/m^2), sendo simbolizada por "I",

quando integrada no tempo de uma hora, ou por “H”, quando integrada no tempo de um dia;

Massa de ar (AM): Razão entre o caminho ótico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na direção de zênite ao nível do mar;

Albedo (GALB): Índice relativo à fração da potência radiante solar, recebida em uma unidade de área, devida à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo.

Figura 1 Na figura 1, estão ilustrados os principais componentes da radiação solar, conforme explanado anteriormente.

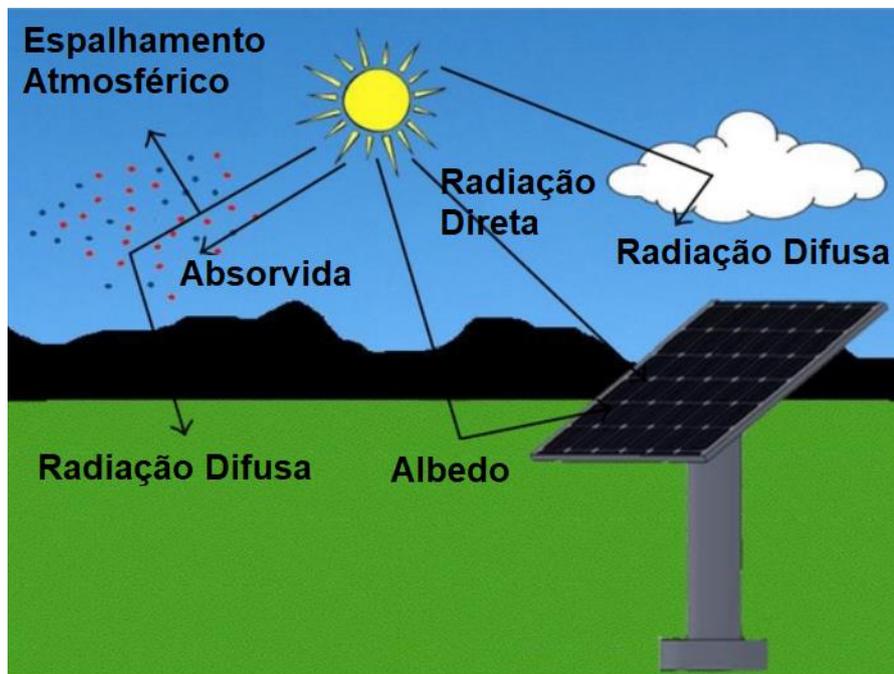


Figura 1 - Componentes da radiação solar.
Fonte: Adaptado de LEE *et al.* (2013)

A Terra gira em torno do Sol em uma órbita elíptica com o Sol em um dos focos. A quantidade de radiação solar que chega à Terra é inversamente proporcional ao quadrado de sua distância do Sol (IQBAL, 1983).

A orientação da órbita da Terra ao redor do Sol é tal que a distância Sol-Terra varia apenas 1,7% e, como a radiação solar fora da atmosfera terrestre, é quase de intensidade fixa, o fluxo de energia radiante recebido por segundo por uma superfície de unidade de área, mantido normal para a direção dos raios do Sol, na

distância média entre o solo e o Sol, fora da atmosfera, é praticamente constante durante todo o ano (AHMAD E TIWARI, 2011).

No entanto, as leituras da radiação solar variam com a latitude geográfica, a estação e a hora do dia, devido às várias posições do Sol em condições meteorológicas imprevisíveis (LI *et al*, 2015).

O Brasil como um todo apresenta uma irradiação média muito elevada, conforme evidenciado o na Figura 2, que mostra a média de radiação no plano horizontal nas regiões brasileiras entre os anos de 1999 a 2015. Percebe-se que na maior parte do território, o país apresenta uma irradiação superior a 5 KWh.m⁻².dia⁻¹.

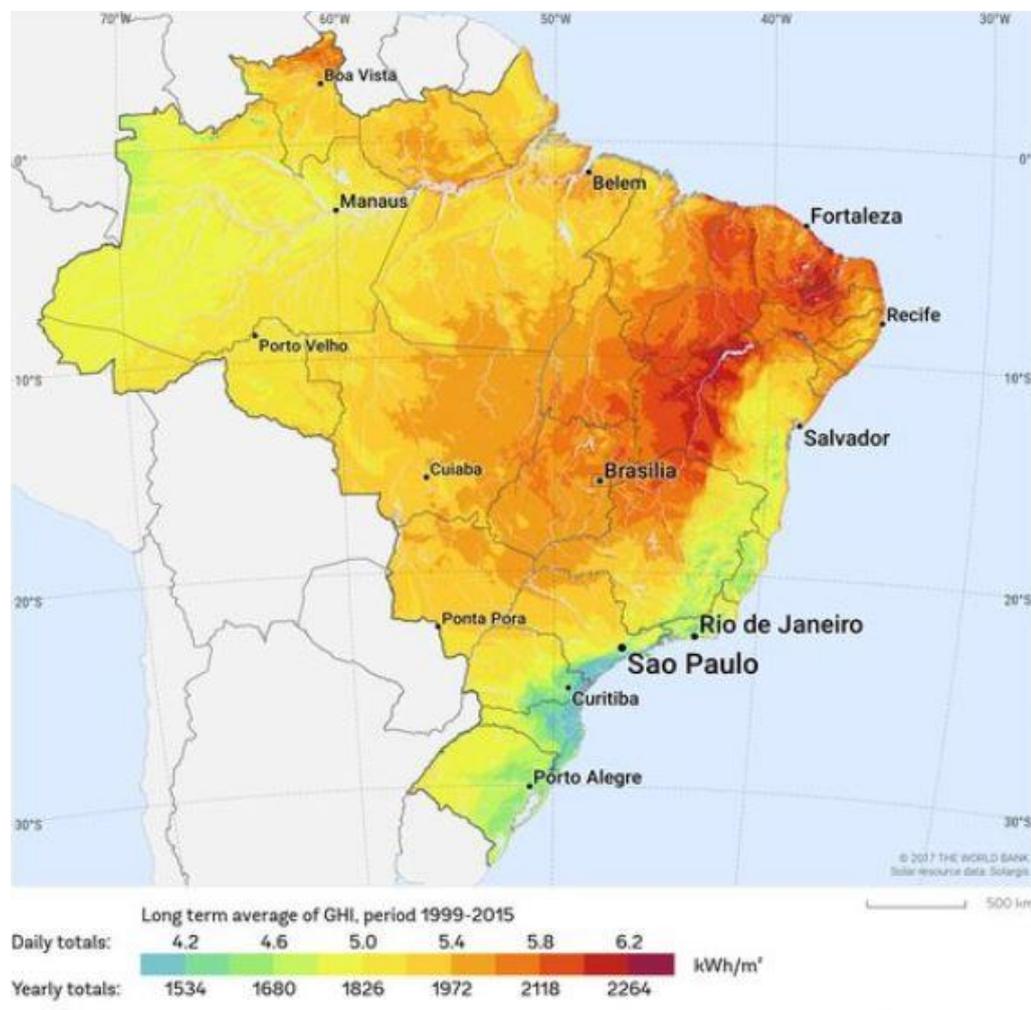


Figura 2 – Irradiação média no plano horizontal no Brasil entre 1999 a 2015.
Fonte: Solargis (2017)

2.2. Energia solar fotovoltaica

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel, ao verificar que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz. Entretanto, apenas em 1954, em razão dos avanços tecnológicos dos semicondutores, foi possível utilizar o efeito fotovoltaico para geração de energia, sendo que, naquele ano, foi desenvolvida por Chapin, Fuller e Pearson a primeira célula fotovoltaica, com uma eficiência de 6% (VALLÊRA E BRITO, 2006, FISCH *et al*, 2017, BRAUN-BRABOLLE, 2010).

Quando a luz solar atinge uma célula fotovoltaica, ela produz uma pequena corrente elétrica. Essa corrente é recolhida por fios ligados à célula, e transferida para os demais componentes do sistema. Sendo assim, quanto mais células fotovoltaicas são ligadas em série ou em paralelo, maior a corrente e tensão produzidas (KEMERICH *et al*, 2016).

Diferente dos coletores de energia solar térmica, cuja única função é aquecer a água por meio da captação do calor do sol, os painéis fotovoltaicos promovem uma transformação da luz solar em energia elétrica (SOUZA *et al*, 2016).

No Brasil, esta alternativa de produção de energia elétrica de fonte renovável se tornou ainda mais viável e se propagou melhor a partir da regulamentação da ANEEL pela Resolução Normativa 482/2012, a qual estabeleceu e difundiu a Geração Distribuída (GD) por meio da microgeração e minigeração disseminadas aos sistemas de distribuição de energia elétrica do Sistema Elétrico Nacional e também criou Sistema de Compensação de Energia (ANNEEL, 2015).

Este Sistema de Compensação, por sua vez, é um sistema no qual a energia é gerada em uma unidade consumidora específica por meio de micro (geração de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 KW) ou minigeração (central geradora com potência instalada superior a 75 KW e menor ou igual a 5 MW), a qual é cedida de forma gratuita à concessionária local e, posteriormente, compensada pela energia elétrica consumida na mesma unidade consumidora ou ainda, em outra unidade com a mesma titularidade, desde que solicitada previamente por meio de cadastro. Nesse caso, quando os créditos de energia gerados excederem à energia consumida, constarão tais créditos na fatura do titular no mês posterior e, em caso de ser gerada energia elétrica em quantidade menor do

que for o consumo, a pessoa física ou jurídica pagará somente a diferença e os impostos (ICMS, PIS/COFINS) dependendo da região em que a unidade esteja localizada (ANNEE, 2015).

Para a produção dessa energia por meio de módulos fotovoltaicos, a NBR 10899 padroniza alguns conceitos de sistemas fotovoltaicos apresentados a seguir (ABNT, 2013):

- Célula fotovoltaica: Dispositivo fotovoltaico elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica;
- Módulo fotovoltaico: unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica;
- Condições padrão de ensaio (STC): Condições de ensaio especificadas na IEC 60904-3 para células e módulos fotovoltaicos. NOTA: Termo equivalente, em inglês, *Standard Test Conditions* (STC);
- Potência de pico ou nominal: Potência de saída de um gerador fotovoltaico, sob as condições padrão de ensaio. A unidade de medida utilizada para a potência de pico ou nominal é o Watt pico (W_p);
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): Corrente de saída de um gerador fotovoltaico, na condição de curto-circuito e para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância. NOTA: Termo equivalente, em inglês, *short circuit current* (I_{sc});
- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): tensão gerada através de um gerador fotovoltaico sem carga (aberto), para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância. NOTA: Termo equivalente, em inglês, *open circuit voltage* (V_{oc});
- Inversor: Conversor estático de potência que converte a corrente contínua do gerador fotovoltaico em corrente alternada.

A norma NBR 11704:2008 intitulada Sistemas Fotovoltaicos – Classificação divide os sistemas fotovoltaicos em: sistema fotovoltaico conectado (SFVCR) à rede de energia elétrica e sistema fotovoltaico isolado (SFVI) da rede de energia elétrica (ABNT, 2008).

2.2.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR)

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede fornecem energia a um edifício ou a outra carga que também está conectada à rede pública. Estes sistemas são geralmente integrados no ambiente e fornecem eletricidade para casas residenciais, edifícios comerciais e industriais. Não há necessidade de unidades de armazenamento de energia, baterias. Esses sistemas estão conectados à rede elétrica, portanto, os custos dos sistemas são menores do que para uma instalação desconectada da rede, apresentado na Figura 3. A eletricidade é realimentada na rede pública quando a geração local excede a demanda da carga (ZAHEDI, 2006).

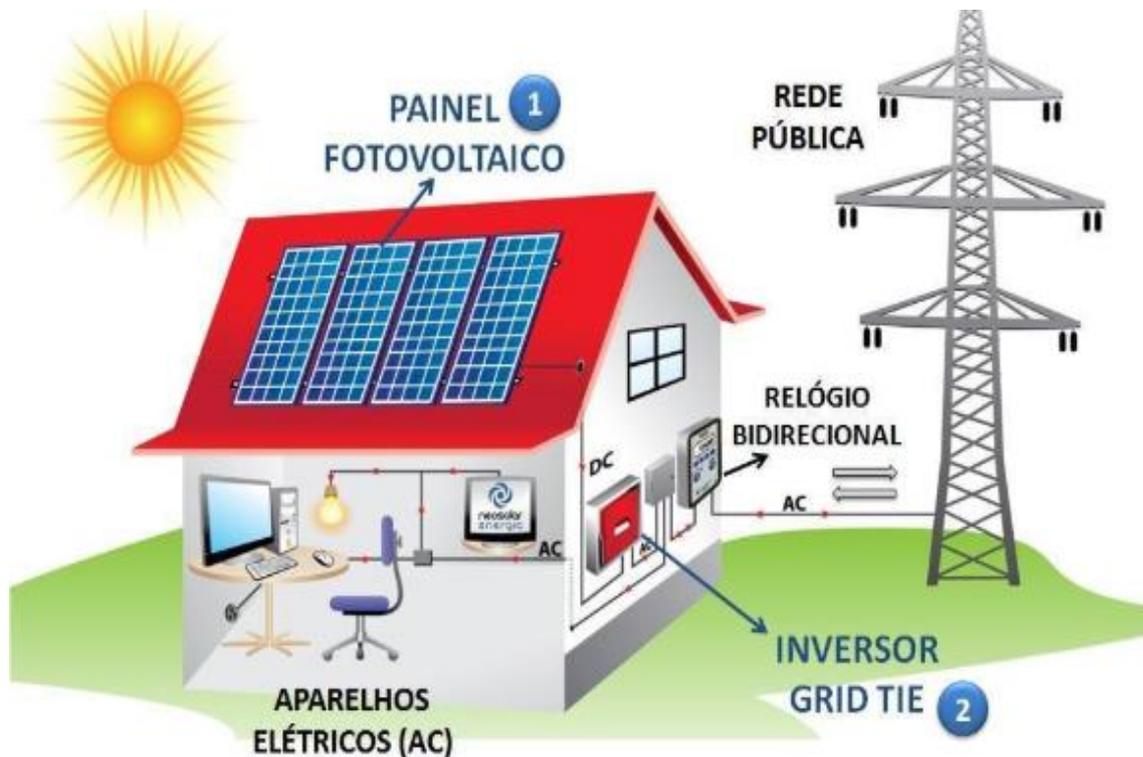


Figura 3 – Sistema Fotovoltaico conectado à rede elétrica.
Fonte: NEOSOLAR (2018)

O sistema conectado à rede tem o papel importante de alimentar a matriz energética brasileira com a produção gerada pelo sistema fotovoltaico e usá-la como uma forma de armazenamento devido ao excesso de produção gerado. A Resolução Normativa Número 482 de 2012 da ANEEL (REN 482/12) determina que, caso a geração de energia elétrica, por meio da cogeração qualificada, seja maior que a demanda, o excedente será injetado na rede elétrica pública. Em contrapartida, o

valor referente a esse excedente será devolvido ao microgerador em forma de desconto na conta de energia paga à concessionária. O sistema, ao injetar a geração na rede, acarreta a redução de geração de energia por usinas de grande porte, aumentando os níveis dos reservatórios das hidroelétricas e reduzindo a queima de combustíveis fósseis, complementa o sistema elétrico ao qual está conectado (SANTOS *et al*, 2017).

2.2.2 Sistemas fotovoltaicos isolados (SFVI)

Os sistemas fotovoltaicos isolados são caracterizados pela carga e pelo gerador fotovoltaico. Para otimizar o sistema, em geral, faz-se uso de um acumulador (bateria), que dissocia as horas de geração do horário de consumo. Para que o acumulador de energia tenha sua vida útil prolongada, faz-se uso de um controlador de carga, com função de controlar e evitar a descarga excessiva no acumulador. O controlador de carga tem como principal função não deixar que ocorram danos na bateria por sobrecarga, ou descarga profunda. O SFVI é usado em sistemas de pequeno porte, visto que os aparelhos são de baixa tensão (MAGALHÃES, 2016, BRAUN-GRABOLLE, 2010), conforme ilustrado na figura 4.

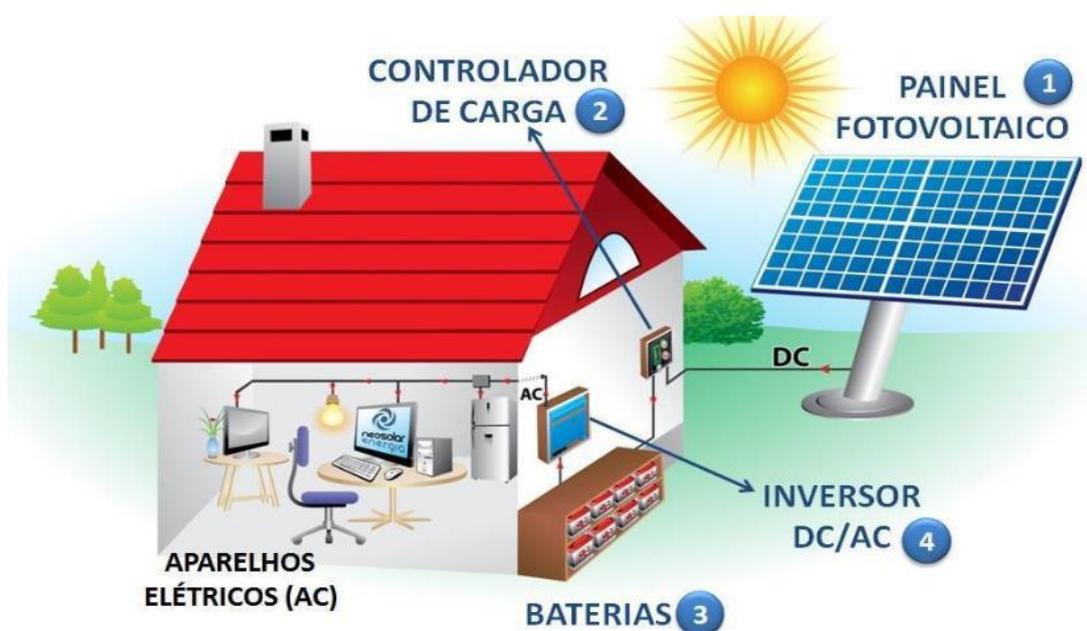


Figura 4 – Sistema Fotovoltaico isolado.

Fonte: NEOSOLAR (2018)

Tais sistemas fornecem energia elétrica para residências e aldeias remotas que não estão conectadas à rede elétrica nacional. Os sistemas fotovoltaicos isolados, geralmente, fornecem eletricidade para iluminação, refrigeração e outras cargas de baixa potência. Milhares desses tipos de sistemas fotovoltaicos foram instalados em todo o mundo e, muitas vezes, figuram como a tecnologia mais adequada para atender demandas energéticas de comunidades fora da rede.

Os sistemas domésticos fora da rede normalmente têm cerca de 2 kW de tamanho e, geralmente, oferecem uma alternativa econômica para não estender a rede de distribuição de eletricidade a distâncias de mais de 1 ou 2 km das linhas de energia existentes. Se a bateria for devidamente dimensionada, fornecem energia com baixa manutenção para uma ampla gama de aplicações, como telecomunicações, bombeamento de água, refrigeração de vacinas e auxiliares de navegação (SANTOS *et al.*, 2017, BRAUN-GRABOLLE, 2010).

2.3. Célula fotovoltaica

As células fotovoltaicas são dispositivos capazes de transformar a energia luminosa que nelas incide, procedente do Sol ou de outra fonte de luz, em energia elétrica (CARVALHO *et al.*, 2004, SIDAWI *et al.*, 2011).

Uma célula fotovoltaica é constituída por duas ou mais camadas finas de um material semicondutor, normalmente o silício. Quando o silício é exposto à luz, são geradas cargas elétricas, que podem ser conduzidas por contatos metálicos para fora da célula na forma de corrente direta. Uma vez que a potência elétrica gerada por uma célula é muito pequena, as células são conectadas entre si e protegidas, normalmente por vidro formando, assim, um módulo. Na Figura 5, estão apresentados os índices de eficiência das tecnologias de células fotovoltaicas.

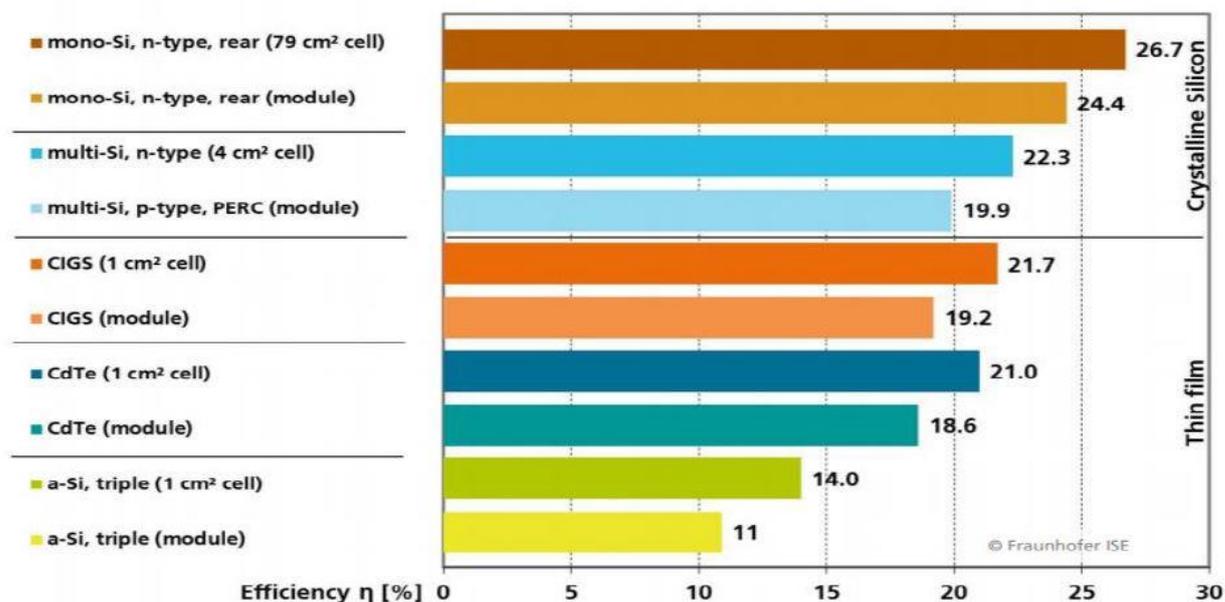


Figura 5- Eficiência das diferentes células fotovoltaicas.
Fonte: FRAUNHOFER INSTITUTE (2018).

Percebe-se na Figura 5 que os painéis solares com tecnologia de silício cristalino apresentam maior eficiência do que a tecnologia de filme fino. Observa-se também que a tecnologia silício monocristalino possui eficiência superior em relação à de silício policristalino.

Os módulos podem ser ligados entre si em número variado, de modo a obter quantidade e eletricidade pretendida, sendo chamado de painel fotovoltaico. A corrente direta obtida dos módulos é direcionada para um inversor que a transforma em corrente alternada, para que esta possa ser injetada na rede elétrica (ROCHA, 2015, TONIN, 2017).

Dentre os diversos materiais usados para a fabricação das células fotovoltaicas, destacam-se o silício monocristalino (m-Si), o silício policristalino (p-Si) e os filmes finos, como o silício amorfo (a-Si), o silício microcristalino (μ c-Si), o telureto de cádmio (CdTe), o índio e gálio e selênio (CIGS). Existem outras tecnologias mais modernas, como as células fotovoltaicas orgânicas, porém sua utilização comercial ainda é limitada (TONIN, 2017).

2.3.1 Tipos de células

A célula de Silício Monocristalino (m-Si) exige que o silício utilizado em sua fabricação tenha uma pureza com grau de no mínimo 99,9999%. A fabricação segue o “processo Czochralski”. Em razão do alto grau de pureza, o custo de fabricação é elevado, contudo, essas células possuem considerável eficiência, bem como atingem rendimentos acima de 18%. As células de silício monocristalino são as mais eficientes disponíveis comercialmente, em larga escala. Na Figura 6, é apresentado um exemplo desta tecnologia de célula (ASSUNÇÃO, 2014, TONIN, 2017).



Figura 6 - Célula de silício monocristalino.

Já as células de silício policristalino possuem um processo de fabricação menos complexo do que o silício monocristalino, pois o policristalino utiliza temperaturas mais baixas do que as empregadas na fabricação do monocristalino. Os módulos fotovoltaicos policristalinos têm eficiências de conversão ligeiramente inferior às dos monocristalinos, contudo, possuem um menor custo de produção, visto que a perfeição cristalina é menor (ASSUNÇÃO, 2014, TONIN, 2017).

Na figura 7, é apresentada um exemplo de célula policristalino.

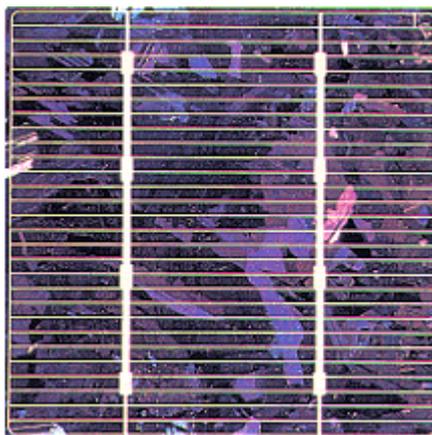


Figura 7- Célula de silício policristalino.

Fonte: CRESESB (2006)

Os processos de produção de Silício Amorfo (a-Si) ocorrem em temperaturas relativamente baixas ($< 300^{\circ}\text{C}$), em processos a plasma, o que possibilita que estes filmes finos sejam depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos. Dessa forma, foram desenvolvidos módulos solares hoje disponíveis no mercado que são flexíveis, mais resistentes mecanicamente, leves, semitransparentes, com superfícies curvas, que estão ampliando o mercado fotovoltaico por sua maior versatilidade (RUTHER, 2004, ASSUNÇÃO, 2014).

A eficiência dos módulos de silício amorfo é baixa, entre 5% e 9%. Além disso, a eficiência dessa tecnologia diminui durante os primeiros 6 a 12 meses de funcionamento em razão da degradação induzida pela luz, até chegar a um valor estável (TONIN, 2017).

A tecnologia de silício amorfo (apresentado na Figura 8) para painéis fotovoltaicos se diferencia das demais por apresentar uma estrutura atômica com alto grau de desordem. Evidencia algumas vantagens na sua forma de fabricação, pois pode ser produzido utilizando diversos tipos de substratos, o que pode significar um custo de produção menor do que as demais tecnologias, desde que produzido em grande escala. Entretanto, a célula de silício amorfo tem uma eficiência menor que as células de silício policristalino e monocristalino, além de sofrer uma maior degradação nos primeiros meses de funcionamento, o que afeta a geração de energia no decorrer de sua vida útil.

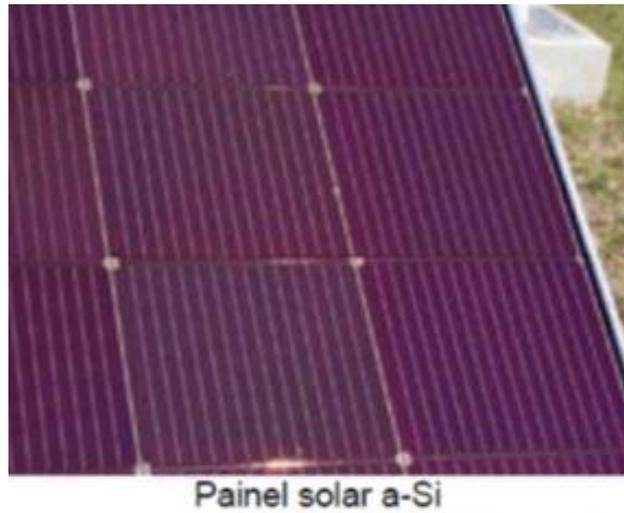


Figura 8 – Painel de silício amorfo.

Fonte: <https://www.portal-energia.com/wp-content/uploadsthumbs/celulas-solares-fotovoltaicas-silicio.jpg>

O Telureto de Cádmio (CdTe) é uma das únicas tecnologias dos painéis solares de película fina (Figura 9) que possui uma relação benefício-custo próxima dos painéis solares de silício cristalino (c-Si), bem como representam a maior parcela do mercado mundial de painéis solares. As desvantagens dessa tecnologia são a relativa alta toxicidade e a baixa disponibilidade dos elementos envolvidos. A eficiência de painéis solares com base na tecnologia de Telureto de Cádmio opera normalmente na faixa de 9-12% (PINHO E GALDINO, 2014).

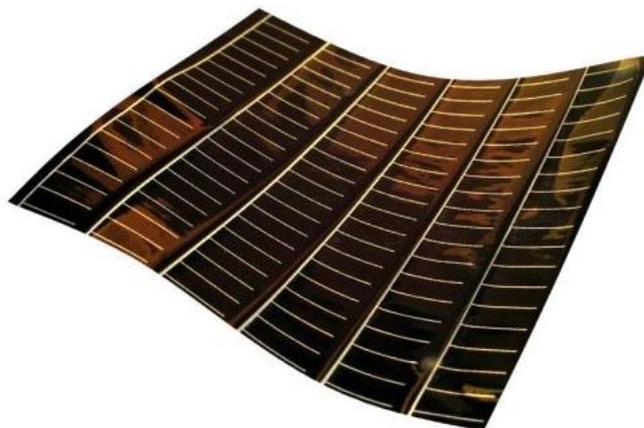


Figura 9 - Célula de Telureto de Cádmio (CdTe).

Fonte: <https://phys.org/news/2011-06-efficiency-flexible-cdte-solar-cell.html>

2.4. Fatores de perdas

Existem várias condições ambientais que afetam a geração de um sistema de energia fotovoltaica. Esses fatores devem ser levados em consideração para que o cliente tenha expectativas realistas de toda a geração do sistema (CHIKATE E SADAWARTE, 2015).

O desempenho do sistema solar fotovoltaico é altamente dependente da localização geográfica, bem como do projeto do sistema. Então, para desenvolver um sistema otimizado, são necessárias ferramentas eficientes de projeto e previsão (RAJ *et al*, 2016).

Existe uma necessidade real de avaliação de desempenho ao ar livre e monitoramento de tecnologias fotovoltaicas, especialmente para novas tecnologias sem experiência de campo, a fim de estabelecer seu desempenho e os desvios observados das condições STC. No entanto, um bom conhecimento de como os parâmetros de projetos fundamentais afetam o desempenho de um sistema de energia fotovoltaica, é essencial para prever e alcançar uma maior eficiência de um sistema fotovoltaico (MONDOC e POP, 2010).

O desempenho das tecnologias fotovoltaicas é normalmente previsto sob condições laboratoriais padrão, STC, de irradiância solar de 1000 W / m^2 , massa de ar de AM 1,5 espectro e temperatura de 25°C . Em instalações ao ar livre, os sistemas fotovoltaicos raramente experimentam essas condições (MONDOC E POP, 2010).

2.4.1. Temperatura

A temperatura do módulo é um parâmetro que tem grande influência no comportamento de um sistema fotovoltaico, pois modifica a eficiência do sistema e a energia de saída. Além disso, os parâmetros atmosféricos, como nível de irradiância e temperatura ambiente, também influenciam. Os efeitos da temperatura são o resultado de uma característica natural de módulos baseados em células de silício cristalino. Eles tendem a produzir maior tensão à medida que a temperatura cai e, inversamente, a perder tensão em altas temperaturas (CHIKATE e SADAWARTE, 2015).

Qualquer cálculo do módulo fotovoltaico ou da redução do sistema deve incluir o ajuste do efeito da temperatura. Quando a temperatura aumenta, o intervalo de banda do semicondutor encolhe, e a tensão de circuito aberto, V_{oc} , diminui conforme a dependência da temperatura de tensão da junção p – n observada no fator de diodo q/kT . As células fotovoltaicas, portanto, têm um coeficiente de temperatura negativo de tensão de circuito aberto. À medida que a temperatura sofre incremento, novamente o intervalo de banda do semicondutor intrínseco encolhe, significando que mais energia incidente é absorvida, porque uma porcentagem maior da luz incidente tem energia suficiente para elevar os portadores de carga da banda de valência para a banda de condução. As células fotovoltaicas têm um coeficiente positivo de temperatura do I_{sc} (CHIKATE E SADAWARTE, 2015).

O principal efeito do aumento da temperatura da célula é a tensão de circuito aberto, que diminui linearmente com a temperatura da célula, reduzindo assim sua eficiência. Conforme a Figura 10, a corrente de curto-circuito aumenta ligeiramente com o incremento da temperatura da célula (CHIKATE E SADAWARTE, 2015).

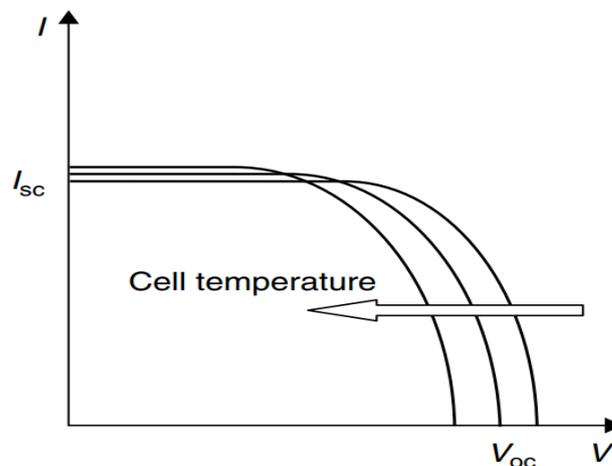


Figura 10- Efeito do aumento da temperatura na célula FV.

Fonte: KALOGIROU (2009)

2.4.2. Sombreamento

Instalações de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas frequentemente estão sujeitas a sombras projetadas por elementos dos arredores, como prédios, árvores, postes, torres, ou até mesmo o relevo da região. Em alguns casos, as

sombras podem ser criadas por elementos da arquitetura do próprio estabelecimento, conforme pode ser visualizado na figura 11, ou até mesmo por módulos adjacentes (IBRAHIM, 2011).

Além das perdas causadas por incompatibilidades elétricas e pontos quentes, instalações fotovoltaicas sujeitas ao sombreamento experimentam uma redução no nível da energia radiante disponível na superfície dos módulos fotovoltaicos. Isso resulta em uma redução direta da energia elétrica gerada pelos mesmos (IBRAHIM, 2011).

Outro tipo de sombreamento é o sombreamento de borda que pode acontecer no campo fotovoltaico em razão da poeira acumulada no conjunto fotovoltaico inclinado. Isso acontece intensamente nas bordas inferiores dos painéis, causando outro tipo de redução. Ibrahim (2011), identificou redução gradual do rendimento de energia de 10% a 20% devido ao acúmulo de uma faixa de poluição permanente na borda da célula emoldurada.



Figura 11 - Sombreamento em módulo fotovoltaico instalado em telhado.

2.4.3. Perdas no inversor

Inversores com baixa eficiência são responsáveis por grande parte das perdas de um sistema fotovoltaico. Além disso, mesmo inversores eficientes

apresentam baixo rendimento quando operam com frações pequenas da potência nominal. Inversores modernos, normalmente, possuem perdas menores, pois apresentam eficiência elevada para uma grande faixa de operação (ALMEIDA, 2012).

Em dias com pouca disponibilidade de recurso solar, a potência em corrente contínua na entrada do inversor é pequena, fazendo com que ele opere quase sempre na faixa de baixo rendimento. Além disso, há a possibilidade de os inversores não injetarem energia na rede, pois necessitam de uma tensão em corrente contínua mínima para operarem, e essa tensão corresponde a irradiação mínima que pode não ser atingida em alguns momentos (ALMEIDA, 2012).

2.4.4. Ângulo de incidência solar ou de inclinação

O melhor ângulo de inclinação para qualquer painel fotovoltaico é aquele que produz a maior quantidade de energia anual para esse local específico. O principal ponto de referência é a latitude, mas outros fatores também estão envolvidos. O arco do sol varia com a época do ano, então, tipicamente, os ângulos de inclinação rasos produzem mais energia nos meses de verão, enquanto os ângulos mais íngremes produzem mais energia nos meses de inverno (GREGG *et al*, 2005).

Geralmente, o ângulo de inclinação ideal varia com o período de utilização, latitude geográfica, clima, ambiente e outros fatores atmosféricos, ou seja, poeira e poluição (XU *et al*, 2017).

Na maioria das aplicações fotovoltaicas, os ângulos de incidência da radiação solar frequentemente diferem substancialmente da incidência normal, que é assumida em condições de teste padrão. Como consequência, as perdas de reflexão podem se tornar significativas no cálculo da geração de energia fotovoltaica. A importância deste efeito depende fortemente da orientação do módulo, bem como das características locais de latitude e clima (MARTIN E RUIZ, 2000). Na figura 12, está representado um módulo fotovoltaico com diferentes inclinações.

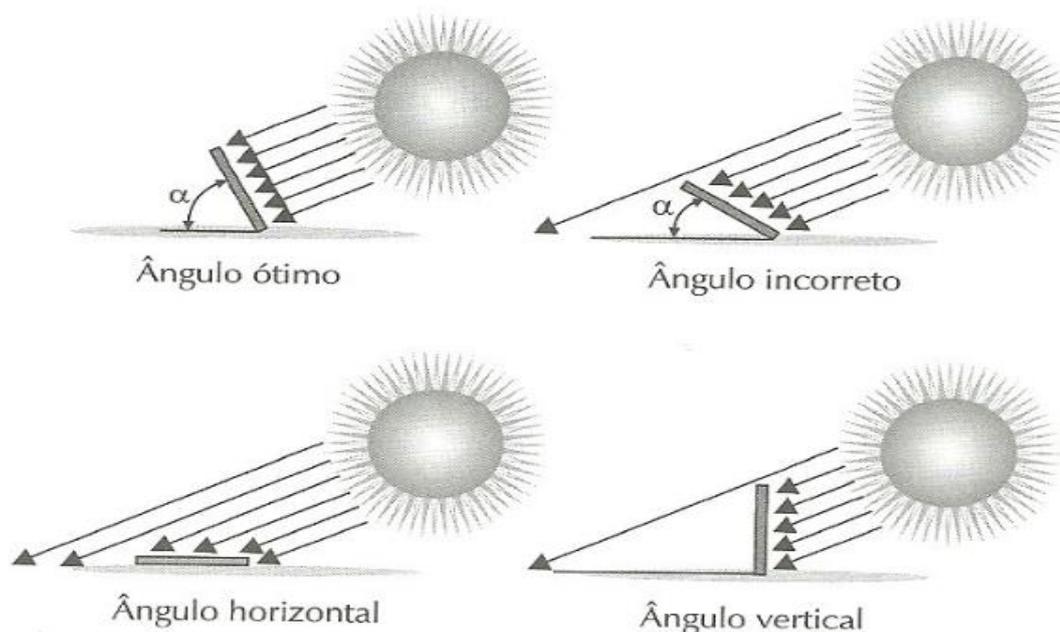


Figura 12 – Ângulo de incidência solar.
 Fonte: STROSKI (2017)

2.5. Parâmetros para avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos

Existem vários parâmetros para avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico, como rendimento específico, fator de utilização da capacidade, índice de desempenho etc. Os dois primeiros são parâmetros comumente relatados nas folhas de desempenho da planta (KHALID *et al*, 2016).

O rendimento final (ou específico) é um indicador importante para o desempenho de um sistema fotovoltaico. É definido como a razão entre a energia final produzida do sistema (kWh) e a do seu valor nominal de potência (kW) (KHALID *et al*, 2016).

Outro parâmetro importante utilizado pelos operadores das usinas é o fator de desempenho de uma usina fotovoltaica, sendo a proporção da energia que está realmente disponível para exportação para a rede, menos a energia perdida por conta dos vários fatores ambientais (por exemplo, degradação, sujeira etc.) e energia consumida no processo de operação (KHALID *et al*, 2016).

O Índice de Desempenho ou taxa de desempenho é considerado um indicador melhor em comparação com o rendimento final do sistema fotovoltaico, em decorrência da sua capacidade de capturar melhor a radiação real. Assim, o rendimento final não pode ser usado para comparar sistemas fotovoltaicos

localizados em regiões diferentes por conta da variação significativa de seus valores de radiação incidentes (KHALID *et al*, 2016).

O fator de utilização de capacidade ou o fator de capacidade, é outro indicador comum usado para determinar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. É definido como a maior potência de saída do sistema fotovoltaico para a saída máxima em condições ideais. O fator de utilização de capacidade não reflete o desempenho real do sistema fotovoltaico, uma vez que não leva em conta fatores como efeitos ambientais, disponibilidade da rede, falhas do sistema etc. Além disso, não considera a irradiação necessária para gerar energia elétrica, os níveis de irradiação em um determinado período de tempo e o efeito de temperatura dos painéis. A taxa de desempenho, por outro lado, é influenciada por fatores climáticos, mas é independente do tamanho e localização da planta (KHALID *et al*, 2016).

2.6. Rastreador solar

Os elementos substanciais dos sistemas fotovoltaicos são as células solares conectadas nos módulos fotovoltaicos. Elas convertem a radiação solar disponível diretamente em eletricidade. A eficiência desta conversão depende da radiação solar que atinge a superfície das células solares, da qualidade e do tipo de células, sua temperatura, conexões entre as células solares nos módulos fotovoltaicos, a correspondência de impedância entre os módulos e as células (SEME *et al*, 2011).

Levando em consideração o fato de que Terra gira sobre seu eixo e orbita em torno do Sol, se um painel/célula fotovoltaico estiver imóvel, a eficiência de absorção será significativamente menor em determinados momentos do dia e do ano. O uso de um sistema de rastreamento para manter o painel perpendicular à incidência solar pode aumentar a energia coletada. Os resultados de experimentos apontam que a potência gerada pelo sistema de rastreamento é no total de cerca de 10% a 40% mais do que o sistema de ângulo fixo em geral. Conseqüentemente, esse acréscimo de potência na saída do painel solar aumenta a eficiência do sistema (CATARIUS E CHRISTINER, 2010, MUSTAFA *et al*, 2018).

Se um sistema de rastreamento não for usado, o painel solar ainda deve estar orientado na posição ideal. O painel precisa ser colocado onde nenhuma sombra incidirá sobre ele a qualquer hora do dia. O melhor ângulo de inclinação deve ser

determinado com base na localização geográfica do painel. Como diretriz geral, o painel fotovoltaico deve ser colocado em um ângulo de inclinação igual à latitude do local e voltado para o norte. No entanto, para uma posição e ângulo de inclinação mais preciso, é criado um modelo teórico de irradiância solar para a duração de um ano, sendo que ângulo e a posição correspondem ao modelo (CATARIUS E CHRISTINER, 2010).

A radiação solar que atinge a superfície da Terra não pode ser influenciada pelo controle do sistema fotovoltaico, uma vez que depende principalmente das condições da atmosfera. Portanto, a radiação solar total que atinge a superfície das células solares sob a forma de radiação direta e difusa, pode ser influenciada por um controle adequado do sistema de rastreamento solar (SEME *et al*, 2011, WU *et al*, 2016).

Durante os dias de sol com céu claro, a radiação direta na forma de raios de sol representa a principal contribuição para a radiação total. A radiação solar disponível que atinge a superfície dos módulos fotovoltaicos é mais alta quando os módulos fotovoltaicos estão alinhados com a direção perpendicular dos raios solares, o que pode ser alcançado pelo uso e controle adequado do sistema de rastreamento solar. Como a direção dos raios solares varia durante o dia, o rastreador solar é considerado uma das principais abordagens para aumentar a eficiência de geração de energia (SEME *et al*, 2011, HOFFMANN *et al*, 2018, WU *et al*, 2016).

Usar um eixo de rastreamento pode fornecer um ganho significativo de energia para o sistema, porém, o mecanismo de rastreamento é caro porque requer alto custo para instalação e manutenção do sistema de geração. Além disso, ainda consome energia, o que requer a avaliação da viabilidade de seu uso (HOFFMANN *et al*, 2018, CATARIUS E CHRISTINER, 2010).

Os sistemas de rastreamento solar podem ser de um eixo, dois eixos, controle em malha aberta ou controle em malha fechada.

2.6.1. Sistema de rastreamento de um eixo

Os rastreadores de eixo único menos complexos e podem ser usados em sistemas de estilo simples que exigem apenas um único eixo de rastreamento (WU *et al*, MAHARAJA *et al*, 2015).

Um rastreador de eixo único só gira em um plano e gira na horizontal ou na vertical, conforme apresentando na Figura 13. Geralmente, é menos difícil de controlar e mais barato que o rastreador de dois eixos, mas é menos eficiente em coletar a irradiação solar (ZAKARIAH *et al*, 2015, MAHARAJA *et al*, 2015).

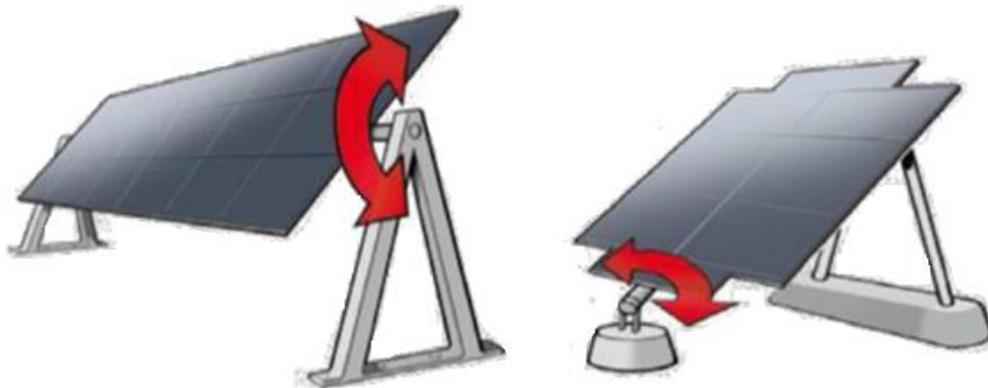


Figura 13 - Sistema de rastreamento solar de um eixo

Fonte: ZAKARIAH *et al*, (2015)

2.6.2 Sistema de rastreamento de dois eixos

Os rastreadores solares com dois eixos permitem obter um rastreamento ideal do caminho do sol, pois mantêm a orientação dos coletores perpendiculares à radiação solar a qualquer momento e em qualquer estação do ano, conforme apresentado na Figura 14. Em vez de usar os painéis fixos, um rastreador de eixo duplo aumenta a potência de saída em torno de 40% (WU *et al*, 2016a, WU *et al*, 2016b, ZAKARIAH *et al*, 2015, MAHARAJA *et al*, 2015, MEREDDY *et al*, 2015).

Tais rastreadores exigem um poste muito robusto perfurado no solo para suportar carga normal. Sua principal desvantagem é a necessidade de uma estrutura pesada, a fim de manter a rigidez em um nível suficiente para sustentar as cargas do painel solar (WU *et al*, 2016, MAHARAJA *et al*, 2015, MEREDDY *et al*, 2015).



Figura 14 - Sistema de Rastreamento solar de dois eixos.
Fonte: ZAKARIAH *et al*, (2015)

2.6.3 Sistema de rastreamento com controle em malha aberta

Os rastreadores solares controlados por circuito aberto são baseados em um algoritmo de controle de rastreamento solar fixo, que depende apenas da data, hora e localização geográfica. Descrevem a posição do Sol calculando os ângulos do zênite solar e do azimute por um número limitado de anos, ou seja, algoritmos diferentes fornecem trajetórias pré-definidas para os sistemas de rastreamento. Essas trajetórias podem ser calculadas com precisão a qualquer momento para qualquer local na Terra (HOFFMANN *et al*, 2018; SAFAN *et al*, 2017).

Rastreadores baseados em data e hora são definidos por um computador que calcula a posição solar com base em dados temporais e controla os motores para alcançar a posição desejada (HOFFMANN *et al*, 2018).

A abordagem de circuito aberto não requer *feedback* das medições da posição do Sol e tem a capacidade de rastreamento, independentemente do grau de clareza do céu e das condições meteorológicas, mas sim de uma fonte de tempo precisa, medidas de ângulos do mecanismo de rastreamento e localização geográfica devem ser fornecidas (SAFAN *et al*, 2017).

2.6.4. Sistema de rastreamento com controle em malha fechada

Os rastreadores solares controlados por circuito fechado possuem um algoritmo de controle de rastreamento dinâmico que depende do *feedback* do sensor de posição do Sol. Os sistemas de circuito fechado usam sensores fotográficos para posicionar os módulos de células solares. Em razão das mudanças permanentes de posição, esses sistemas podem gastar mais energia do que eles ganham, especialmente quando o tempo está mudando (SEME *et al*, 2011, SAFAN *et al*, 2017).

A configuração de circuito em malha fechada pode ser simples na implementação, mas a confiabilidade pode ser afetada por desvios na eletrônica analógica utilizada por conta dos requisitos de limpeza e ao seu ângulo de aceitação limitado (SAFAN *et al*, 2017).

Rastreadores podem ser baseados em sensores ópticos e microprocessadores, sendo que esses seguidores possuem pelo menos dois sensores ópticos com uma diferença angular. Quando há uma diferença na luz recebida, o motor é ativado usando um microprocessador até que ambos recebam a mesma intensidade de luz e estejam eletricamente balanceados, indicando uma posição perpendicular aos raios de sol (HOFFMANN *et al*, 2018).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização do experimento

O experimento foi realizado na propriedade rural de um produtor de soja, conforme visualizado na Figura 15, no distrito de Sede Alvorada que possui as coordenadas geográficas 24.8258919° de latitude sul e 53.6472226° de longitude oeste, com altitude de 638 metros.



Figura 15 – Local de realização do experimento.

O distrito de Sede Alvorada localiza-se na Região Oeste do estado do Paraná e apresenta, de acordo com o SUNDATA 2017, uma irradiação média de $4,78\text{kWh/m}^2 \text{ dia}^{-1}$ no plano horizontal, conforme visualizado na figura 16, e irradiação média de $4,99\text{kWh/m}^2 \text{ dia}^{-1}$ para a orientação norte e ângulo de inclinação de 25° (ângulo de maior média mensal) tal como pode ser visto na Figura 17 e na Tabela 1.

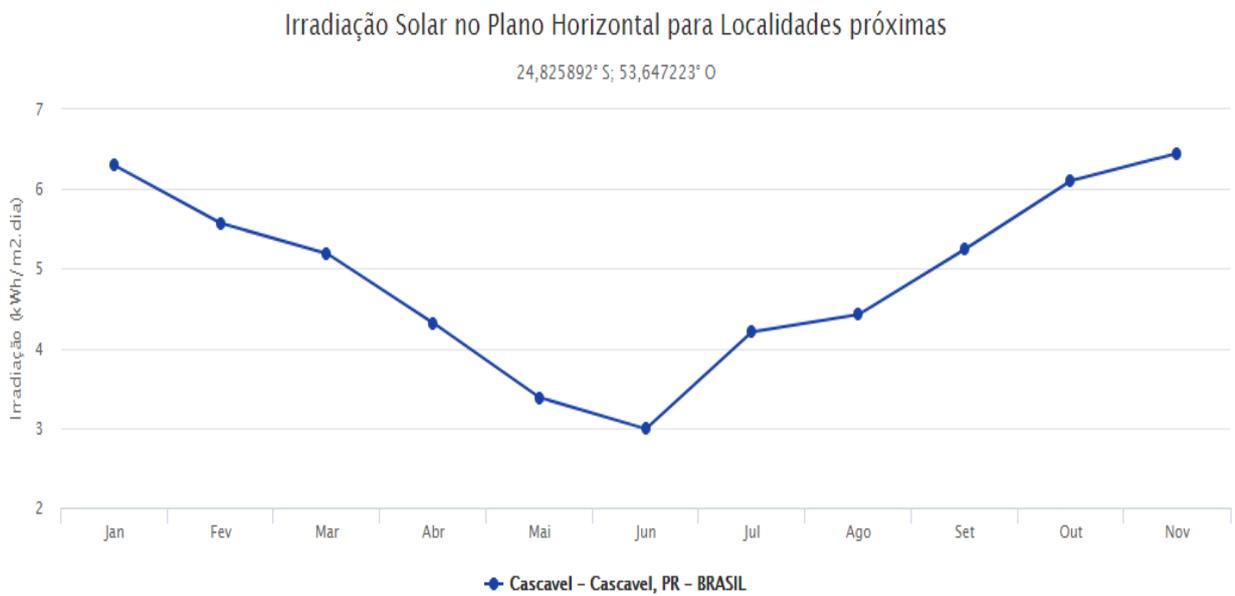


Figura 16 – Irradiação Solar no Plano Horizontal em Cascavel PR.
Fonte: SUNDATA, 2017.

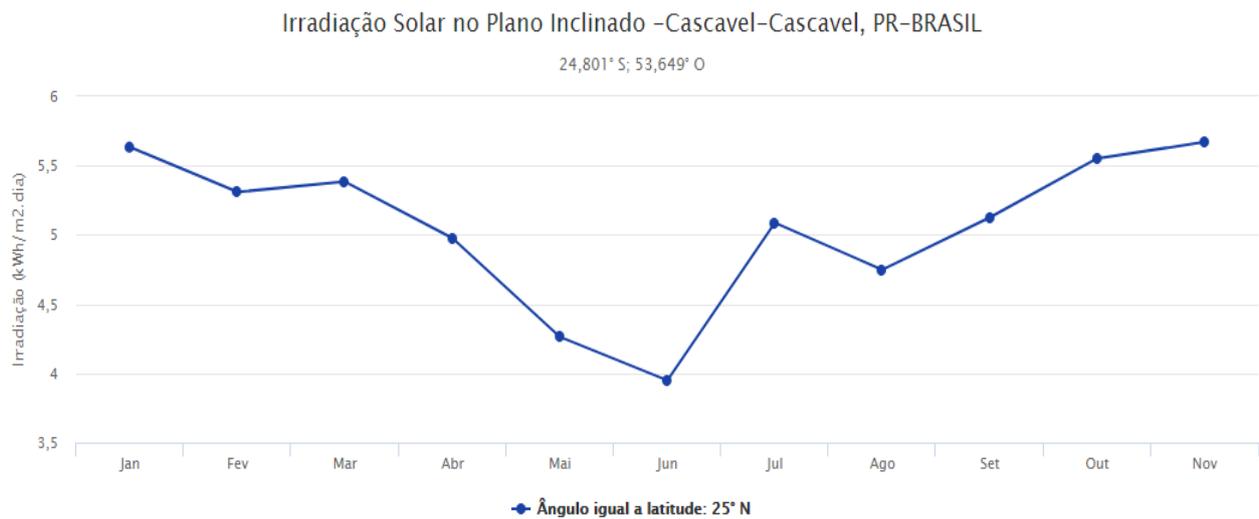


Figura 17– Irradiação Solar no Plano Inclinado em Cascavel PR.
Fonte: SUNDATA, 2017.

Tabela 1. Irradiação Solar Média no Plano Horizontal e Inclinado em Cascavel PR

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média (kWh.m ⁻² .dia ⁻¹) por mês do ano												Média
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Igual a latitude	25 graus Norte	5,63	5,31	5,38	4,98	4,26	3,95	4,15	5,09	4,75	5,13	5,55	5,67	4,99
Plano Horizontal	0 graus	6,29	5,57	5,19	4,32	3,38	2,99	3,2	4,21	4,42	5,24	6,1	6,45	4,78

Fonte: SUNDATA, 2017

Neste trabalho, foi realizado estudo e modelagem computacional para o desenvolvimento de um Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar e um Sistema

Fotovoltaico Fixo. Após a modelagem, foi realizada a fabricação e instalação dos Sistemas Fotovoltaicos. Foi desenvolvido também o projeto elétrico e realizada a aprovação na companhia de energia local.

Em seguida, o Sistema entrou em operação gerando energia para suprir a carga instalada na propriedade e, eventualmente, nos momentos em que a geração foi superior ao consumo da propriedade, o sistema injetou o excedente na rede elétrica da companhia de energia, sendo os créditos registrados no medidor bidirecional do padrão de entrada atendido em baixa tensão, sendo a unidade consumidora classificada como produtor rural.

3.2. Especificações técnicas dos materiais utilizados

3.2.1 Painel solar fotovoltaico (módulo)

Foram realizados dois experimentos, isto é, o primeiro foi a montagem de um sistema fotovoltaico fixo em uma estrutura com inclinação igual a latitude do local (25°) orientado para o norte. O segundo experimento foi a montagem de um sistema fotovoltaico com rastreador em um eixo.

Foram utilizados dois módulos fotovoltaicos em cada experimento, totalizando quatro painéis solares, sendo que cada módulo fotovoltaico (Figura 18) possui 275W de potência, fabricante GCL SOLAR, modelo GCL-P6/60275, com 60 células em cada painel. Esses painéis apresentam corrente nominal de 8,76 A, tensão de circuito aberto de 38,50V, tensão nominal de 31,40V, conforme visualizado na Tabela 2 que mostra as especificações técnicas de cada módulo.



Figura 18 – Painel Solar GCL SOLAR, modelo GCL-P6/60275, potência 275W.

Tabela 2. Dados Técnicos do Módulo GCL SOLAR, modelo GCL-P6/60275

Modelo	GCL-P6/60275
Potência Máxima (Pmax)	275 W
Corrente Nominal em Pmax (Imp)	8,76 A
Tensão Nominal em Pmax (Ump)	31,40 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	9,38 A
Tensão de circuito aberto (Uoc)	38,50 V
Dimensões (Comprimento x Largura x Espessura)	1650x990x35mm
Eficiência	16,90%

3.2.2 Microinversor Solar

Foram utilizados dois microinversores, fabricante Northern Electric (NEP), modelo BDM-300X2-EU-D, com 500W de potência nominal de saída em corrente alternada cada um. Cada microinversor suporta dois painéis e possui um rastreador de máxima potência (MPPT) individual para cada painel, de forma a otimizar a produção de energia. Em razão de tal microinversor possuir dois MPPTs, caso um painel esteja parcialmente sombreado o outro ainda estará gerando sua potência máxima.

O microinversor NEP 500, explicitado na Figura 19, possui registro no INMETRO número 008087/2017, é um microinversor projetado para funcionar em sistemas conectados à rede (*On-Grid*), injetando a energia produzida na mesma tensão e corrente da rede. Além disso, possui ainda proteção anti-ilhamento, ou seja, caso a energia da rede da concessionária seja interrompida, instantaneamente o inversor interrompe a geração.



Figura 19 – Microinversor, fabricante Northern Electric (NEP), modelo BDM-300X2-EU-D

A Tabela 3 apresenta as informações técnicas do microinversor.

Tabela 3. Especificações Técnicas do Microinversor NEP

Modelo	BDM-300X2-EU-D
Potência Máxima de Saída AC	550 W
Potência Nominal de Saída AC	500 W
Corrente Máxima de Saída AC	2,4 A
Tensão Nominal de Saída AC	220 V
Frequência Nominal de Saída AC	60 Hz
Tensão Máxima em Cada Entrada	60 VCC
Dimensões	277mm X 132mm X 50mm
Peso	4.0 Kg
Faixa de Tensão do MPPT	22 - 55 VCC

3.2.3 Medidor de Energia

O monitoramento, aquisição e registro dos dados de geração de energia do sistema fotovoltaico foram realizados por meio de dois medidores de energia, fabricante ITEAD SONOFF, modelo POW R2, visualizado na Figura 20, e um medidor modelo SONOFF POW, fabricante ITEAD.



Figura 20 – Medidor de Energia, fabricante ITEAD SONOFF, modelo POW R2.

Esses medidores de energia possuem comunicação sem fio (via *WI-FI*) com a rede de internet local, além de o fabricante disponibilizar gratuitamente o aplicativo *EWELINK* para plataforma Android, permitindo o monitoramento por intermédio de *smartphone* e de *tablets*. No aplicativo, os dados de tensão, corrente e potência são exibidos em tempo real, além de o dispositivo realizar o registro da geração de energia. Esse registro também está disponibilizado em formato de planilha. Na Tabela 4, são explicitados os dados técnicos do medidor de energia.

Tabela 4. Especificações Técnicas do Medidor de Energia, fabricante ITEAD SONOFF

Modelo	POW R2
Potência Máxima	3500 W
Tensão de Funcionamento	90 A 250 VCC
Corrente Máxima	15 A
Corrente Mínima	1m A
Frequência	60 Hz
Dimensões	114mm X 52mm X 32mm

3.2.4 Estrutura Fixa em Inclinação Igual a Latitude

Foi desenvolvido o projeto da estrutura fixa para dois painéis em software computacional, obtendo-se o modelo representado na Figura 21. No projeto modelado computacionalmente, a estrutura fixa desenvolvida possui um ajuste da inclinação de zero a trinta graus em relação ao plano horizontal. A Figura 22 apresenta a vista lateral da estrutura.

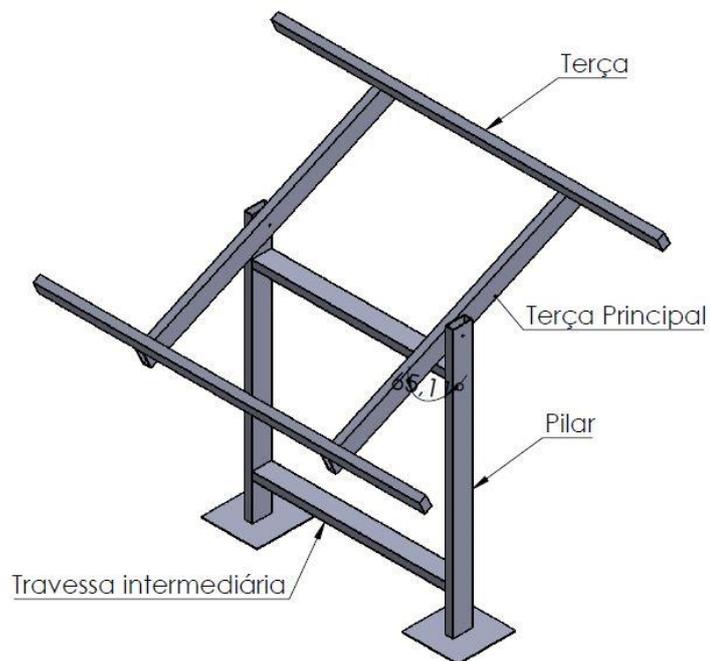


Figura 21 – Vista Isométrica da Estrutura Fixa, modelada em software computacional.



Figura 22 – Vista Lateral da Estrutura Fixa, modelada em software computacional.

3.2.5 Estrutura de Rastreador Solar em Um Eixo

O rastreador solar de um eixo foi desenvolvido em software computacional com o objetivo de atender as especificações técnicas do objetivo proposto. Foi realizada a modelagem dos componentes, a montagem e a simulação do protótipo em ambiente virtual, conforme mostrado nas Figuras 23 e 24.



Figura 23 – Vista Isométrica Rastreador Solar de Um Eixo, modelado em software computacional.



Figura 24 – Rastreador Solar de Um Eixo Renderizado.

3.2.6 Atuador Linear de Fuso Trapezoidal

Para realizar a movimentação da mesa superior da estrutura do rastreador de um eixo, foi utilizado um atuador linear de fuso trapezoidal com 520 mm de curso acionado por motor elétrico monofásico com redução de 1 para 23, fabricante PPA, modelo *Pivo Home*, conforme visualização na Figura 25.



Figura 25 – Atuador Linear de Fuso Trapezoidal, com Redução e Motor Monofásico, fabricante PPA.

A Tabela 5 exibe as informações técnicas do Atuador Linear de Fuso Trapezoidal.

Tabela 5. Especificações Técnicas do Atuador Linear de Fuso Trapezoidal

Tensão de Operação	127 V / 220 V
Potência Nominal em 127 V	370 W
Potência Nominal em 220 V	500 W
Corrente em 127 V	3,1 A
Corrente em 220 V	2,2 A
Frequência	60 Hz
Rotação do motor	1740 RPM
Redução	1:23
Comprimento Curso	520 mm
Diâmetro do Fuso	0,5 "
Passo do Fuso	30 mm
Tempo Abertura/Recuo	18 s

3.2.7 Temporizador Digital

Para realizar o controle do acionamento do motor do atuador linear utilizado para movimentação da mesa superior da estrutura do rastreador de um eixo, foi utilizado um temporizador digital, fabricante Exatron, modelo TMDS0BC, com dezoito programações, conforme Figura 26.



Figura 26 – Temporizador Digital, fabricante EXATRON.
 Fonte: <https://www.exatron.com.br/produtos/timers-temporizadores>

A Tabela 6 mostra a folha de dados do equipamento.

Tabela 6. Dados Técnicos do Temporizador Digital, fabricante Exatron, modelo TMDS0BC

Tensão	220 VCA
Corrente	10A
Frequência	60 Hz
Consumo máximo	0,7 W
Peso	180 g

3.2.8 Quadro Elétrico

Foi utilizado um quadro elétrico para instalação dos equipamentos elétricos dos sistemas fotovoltaicos, como disjuntores, medidores de energia, contadores e temporizador digital. O quadro elétrico possui grau de proteção IP 66, é resistente à chuva e poeira, pode ser instalado em local aberto e possui dimensões de 500 x 500 x 250 mm, fabricante Opção Painéis, conforme observa-se na Figura 27.



Figura 27– Quadro Elétrico de Comando e de Força, fabricante Opção Painéis.

3.3. Caracterização dos métodos

3.3.1 Fabricação e Instalação do Sistema Fotovoltaico Fixo e de Um Eixo

A partir da definição do projeto e simulação em *software* computacional foi realizada a aquisição do aço estrutural especificado na lista de materiais do projeto. Foi realizada a compra de aço carbono 1020, fabricante Gerdau, de acordo com o projeto. As barras foram cortadas nas medidas definidas no projeto, para produzir cada componente da estrutura. Em seguida, foram soldados todos os componentes da montagem, conforme visualização na Figura 28.



Figura 28 – Montagem das Estruturas para Sistemas Fotovoltaicos Fixo e Móvel.

Após a montagem, foi realizada a pintura de toda a estrutura metálica para proteção contra corrosão.

Em seguida, definiu-se o posicionamento das estruturas. Em local apropriado, foram realizadas as escavações no solo com dimensões de 400 x 400 x 300mm para a fixação de cada pilar. Após a retirada do solo, as quatro sapatas foram concretadas.

Decorrido o período para a cura do concreto, realizou-se a instalação da estrutura fixa e da estrutura de um eixo no local determinado, conforme a Figura 29, fixando-se a base dos pilares nas sapatas de concreto por meio da utilização de chumbadores mecânicos.



Figura 29 – Instalação das Estruturas no Local do Experimento.

3.3.2 Projeto Elétrico do Sistema Fotovoltaico Fixo e de Um Eixo

Foi desenvolvido o projeto elétrico para os sistemas fotovoltaicos, de acordo com a Figura 30, que foi submetido para aprovação na companhia de energia local.

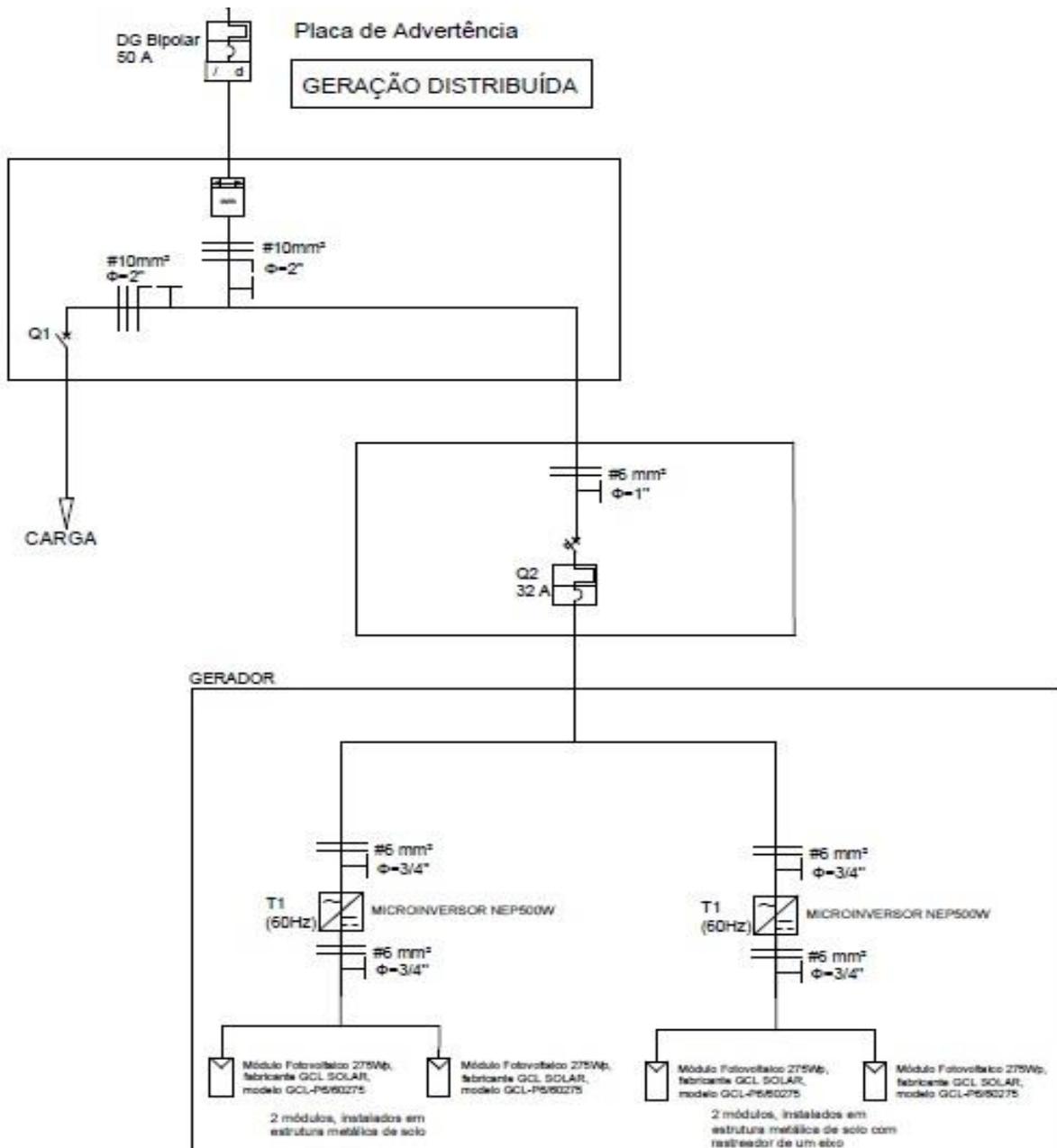


Figura 30 – Diagrama Unifilar do Projeto Elétrico Fotovoltaico.

3.3.3 Instalação dos Painéis e Instalação Elétrica

Após a aprovação do Projeto Elétrico na companhia de energia local, foram instalados os dois microinversores, sendo um em cada estrutura, conforme Figura 31.



Figura 31 – Fixação do Microinversor na Estrutura.

Foram instalados os eletrodutos, disjuntores, cabos, medidores de energia, temporizador, contadores, haste de cobre para sistema de aterramento, dois painéis solares na Estrutura de um Eixo (Figura 32) e dois painéis na Estrutura Fixa, Figuras 33 e 34, de acordo com as especificações do projeto elétrico.



Figura 32 – Fixação dos Painéis Fotovoltaicos na Estrutura de Um Eixo.



Figura 33 - Fixação dos Painéis Fotovoltaicos na Estrutura Fixa.



Figura 34 – Instalação do Quadro Elétrico na Estrutura Fixa.

3.3.4 Monitoramento e Registro da Produção de Energia

A coleta de dados de geração de energia nos dois sistemas fotovoltaicos foi realizada a partir dos medidores de energia, modelo POW R2, fabricante ITEAD SONOFF, sendo transmitidos em tempo real para o aplicativo *EWELINK*, disponibilizado gratuitamente pelo fabricante. As informações transmitidas foram correntes, tensão e potência instantânea, conforme Figura 35.



Figura 35 – Telas de Monitoramento do Aplicativo *EWELINK*.

Os medidores SONOFF POW R2 gravam em sua memória interna o registro da energia diária gerada. Esse registro pode ser transferido a partir do aplicativo *EWELINK* para o *smartphone* ou *tablet*, em formato de planilha, que fornece data, energia diária gerada em kWh e o valor do crédito equivalente em reais da energia gerada (varia em função da tarifa de energia cobrada pela concessionária de energia).

3.3.5 Avaliação do Sistema Fotovoltaico Fixo

Pode-se perceber que o sistema fotovoltaico com rastreador fixo, projetado no software de modelagem computacional *Solidworks* de forma a possuir ajuste de inclinação de 0 a 30° em relação ao plano horizontal, conforme visualiza-se na Figura 36.

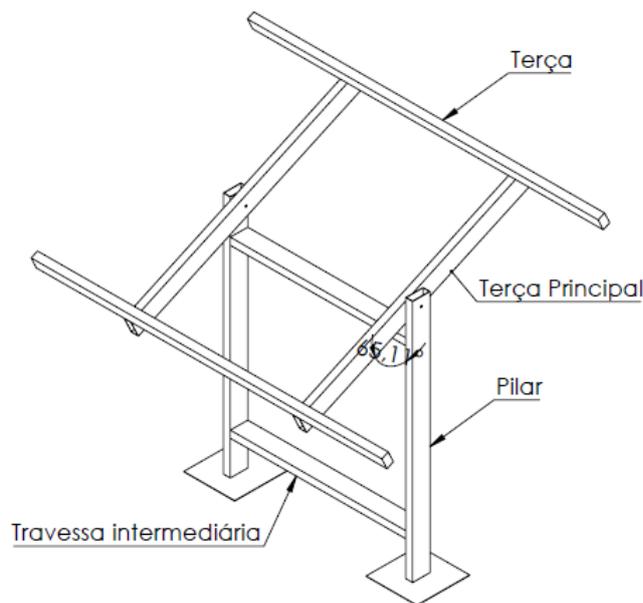


Figura 36 – Protótipo Sistema Fotovoltaico Fixo, com ajuste de inclinação de 0 a 30°.

A estrutura fixa foi instalada no local do experimento com orientação norte e 25° de inclinação, ângulo de maior média mensal para o local. Foram utilizados painéis solares de 275Wp, fabricante GLC SOLAR, modelo GCL-P6/60275 no sistema fotovoltaico fixo, sendo a potência fotovoltaica total do sistema de 550W.

3.3.6 Avaliação do Sistema Fotovoltaico de Um Eixo

O sistema fotovoltaico com rastreador em um eixo foi projetado a partir do software de modelagem computacional *Solidworks*, no qual foram desenvolvidos vários protótipos (modelados computacionalmente) do rastreador solar, conforme Figura 37.

Foram utilizados dois módulos fotovoltaicos de 275Wp, fabricante GLC SOLAR, modelo GCL-P6/60275, no sistema fotovoltaico de movimentação em um eixo, sendo a potência fotovoltaica total de 550W.

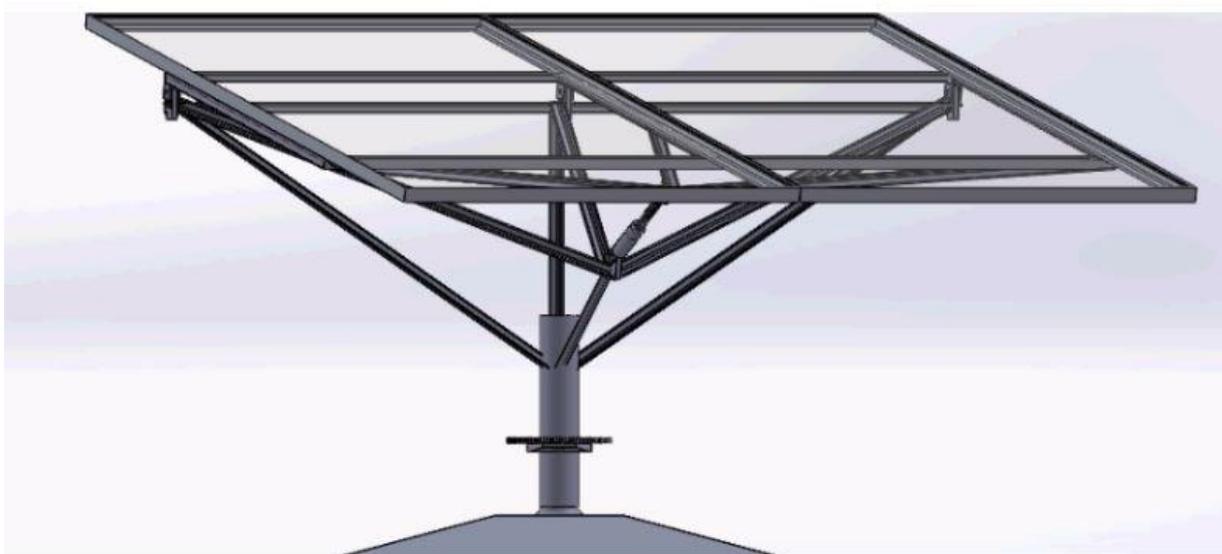


Figura 37 - Protótipo modelado computacionalmente em *software SOLIDWORKS*.

Após a análise e simulação desses projetos, com o objetivo de determinar o projeto com melhor benefício-custo, buscando atender a funcionalidade com menor custo de fabricação e menor alteração possível em relação à estrutura fixa, optou-se pela construção do protótipo exibido na Figura 38.



Figura 38 - Protótipo para Sistema Fotovoltaico de Um Eixo

O material definido para fabricação do rastreador solar foi aço estrutural (aço carbono 1020). O controle da movimentação do rastreador foi por meio de um temporizador que aciona um contator a cada hora. O contator liga um motor elétrico monofásico e, a partir de uma redução, aciona o fuso trapezoidal que, por sua vez, realiza um movimento linear no pistão, ao passo que o pistão avança por estar conectado à estrutura superior. Com isso, ele provoca um movimento angular na mesa superior da estrutura. Os dois painéis estão apoiados e fixados por parafusos na mesa superior da estrutura. A velocidade teórica de avanço do atuador linear pode ser calculada por meio da Equação 1:

$$V_{\text{pistão}} = f_{\text{rpm}} \cdot i_{\text{transm}}^{-1} \cdot P_{\text{fuso}} \cdot \Delta t^{-1} \quad (1)$$

Onde:

$V_{\text{pistão}}$ – Velocidade de avanço do pistão (milímetros por segundo);

f_{rpm} – Frequência de rotação do motor em rotações por minuto;

i_{transm} – Relação de transmissão da caixa de redução;

P_{fuso} – Passo do fuso em milímetros;

Δt – Intervalo de tempo em segundos.

3.3.7 Apresentação dos Dados e Formas de Análise

Por intermédio dos medidores de energia SONOFF POW, os dados coletados do sistema fotovoltaico fixo e do sistema fotovoltaico com rastreador em um eixo foram apresentados em forma de tabelas, com a data e a geração de energia diária. Foram calculadas as médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação em cada sistema fotovoltaico.

Foi realizada uma avaliação comparativa dos dados de geração dos dois sistemas fotovoltaicos, analisando também a confiabilidade dos resultados obtidos. O consumo do motor elétrico monofásico para movimentação do sistema fotovoltaico com rastreador solar será analisado e avaliado em conformidade com a porcentagem de energia requerida para o funcionamento do rastreador ao longo do experimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação do Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar em Um Eixo

O sistema fotovoltaico com rastreador de um eixo adotado foi o de malha aberta, baseado na latitude do local, data e hora, com trajetória pré-definida sem utilizar sensores para detectar a posição do sol. Portanto, mesmo em dias chuvosos e com condições meteorológicas adversas, o rastreador de um eixo desenvolvido foi capaz de manter sua trajetória. Entretanto, necessita de grande precisão na medição do tempo e exige que o movimento angular tenha grande exatidão.

A relação de transmissão (i_{transm}) do motor monofásico utilizado é 1:23, ou seja, a cada volta do motor (Figura 39), ocorre uma volta completa do fuso trapezoidal, que possui um passo de 30 milímetros (P_{fuso}), provocando o avanço linear de 3 centímetros no pistão. A rotação do motor monofásico utilizado é de 1740 rotações por minuto. Desta forma, pode-se calcular a velocidade de avanço do pistão $V_{pistão}$ por meio da Equação 1, obtendo-se uma velocidade de avanço de 37,82 milímetros por segundo.

No rastreador solar desenvolvido, obteve-se uma grande precisão no tempo, pois o temporizador utilizado é digital, com precisão de milissegundos e com bateria interna, isto é, não perde a data, hora nem sua programação em caso de falta de energia da rede pública. Entretanto, não se obteve uma movimentação angular precisa, provavelmente em razão da grande velocidade de avanço do atuador linear para esta aplicação. A sequência de movimentação do sistema fotovoltaico com rastreador de um eixo é visualizada na Figura 39.

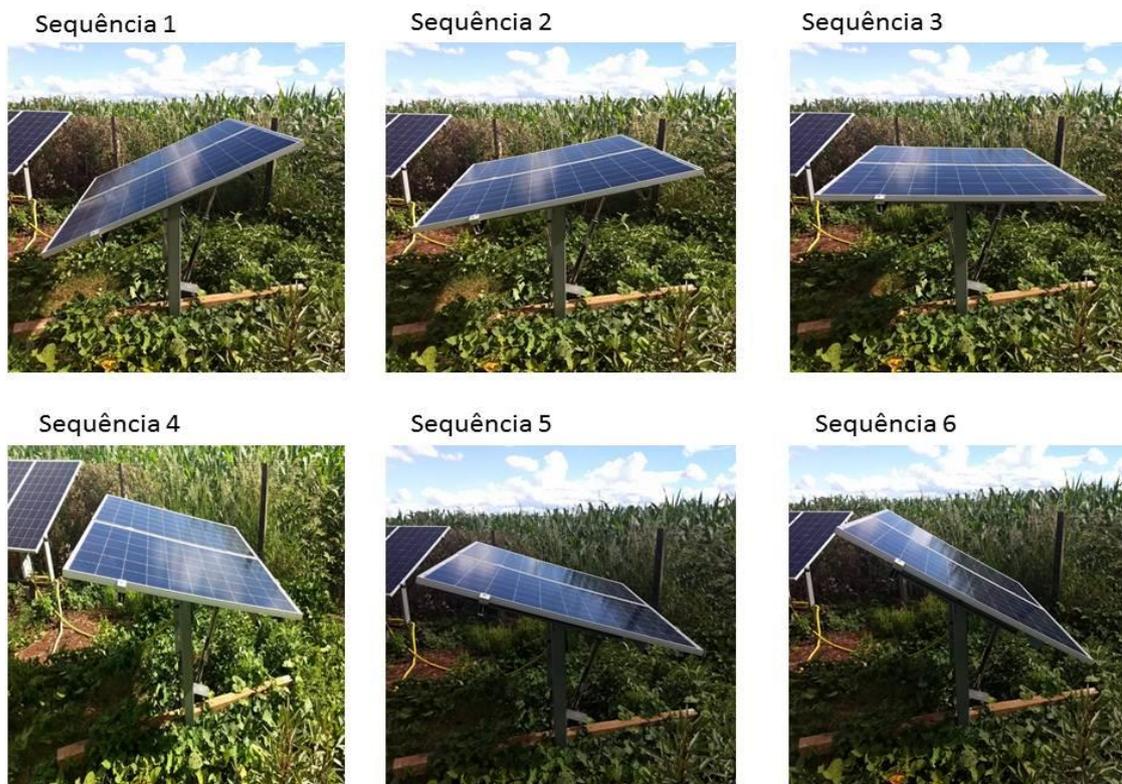


Figura 39 – Sequência de Movimentação do Sistema Fotovoltaico com Rastreador de Um Eixo.

Contudo, os atritos mecânicos, o peso da estrutura e dos próprios painéis geram uma força resistiva que atrapalha o movimento do pistão. Então, foi cronometrado o tempo de avanço do atuador linear e, em seguida, calculou-se a razão do comprimento do curso do pistão (em milímetros) pelo tempo medido (em segundos) e obteve-se velocidade média de 37,02 milímetros por segundo, que é alta para a aplicação.

Uma solução seria alterar a relação de transmissão, para reduzir a velocidade angular do fuso e, portanto, reduzir a velocidade de avanço do pistão. Outra alternativa seria a utilização de um inversor de frequência, com o objetivo de reduzir a frequência do motor e, conseqüentemente, reduzir a velocidade de avanço do pistão.



Figura 40 – Motor monofásico com caixa de redução de 1:23 acoplado ao fuso trapezoidal.

4.2. Avaliação Comparativa dos Dados de Geração dos Sistemas Fotovoltaicos

Com base nos dados que foram gerados no sistema fotovoltaico fixo e no sistema fotovoltaico com rastreador solar de um eixo, foram calculadas as médias de geração diária do SFV com Rastreador e do SFV Fixo. A partir desses dados coletados, foram gerados valores do desvio padrão e coeficiente de variação para cada média.

No período de 3 de fevereiro de 2019 a 23 de fevereiro 2019, o SFV com Rastreador Solar gerou 42060 Wh de energia, enquanto que o SFV Fixo produziu 21810 Wh de energia.

Tabela 7. Geração de energia no Sistema Fotovoltaico com Rastreador de Um Eixo e no Sistema Fotovoltaico Fixo

	Sistema Fotovoltaico Fixo	Sistema Fotovoltaico com Rastreador de Um Eixo
DATA	Energia Gerada (Wh)	Energia Gerada (Wh)
03/02/2019	2010	2550
04/02/2019	850	1260
05/02/2019	1490	1880
06/02/2019	1970	2790
07/02/2019	650	2770
08/02/2019	1740	2690
09/02/2019	1670	2780
10/02/2019	630	1010
11/02/2019	500	1440
12/02/2019	1130	2150
13/02/2019	360	2040
14/02/2019	20	3640
15/02/2019	800	2580
16/02/2019	0	0
17/02/2019	530	0620
18/02/2019	920	2320
19/02/2019	160	0350
20/02/2019	640	1770
21/02/2019	1910	2370
22/02/2019	1610	2230
23/02/2019	2220	2820
Média	1040	2000
Desvio Padrão	0,702718192	0,926121714
Coeficiente Variação	0,676619992	0,462400285

Ao analisar a Tabela 7, observa-se que o Sistema Fotovoltaico com Rastreador de Um eixo apresentou um Coeficiente de Variação (CV) menor que o Sistema Fotovoltaico Fixo, mostrando que os resultados obtidos com o Rastreador de Um Eixo possuem maior confiabilidade do que os resultados do fixo.

Se verificou também que, em alguns dias, o Sistema Fotovoltaico Fixo não apresentou geração ou teve uma geração muito baixa – dias 7, 13 e 14 de fevereiro – enquanto o Sistema Fotovoltaico Com Rastreador de Um Eixo obteve uma grande geração nesses mesmos dias. Acredita-se que o microinversor do Sistema Fixo pode ter interrompido a geração em razão da subtensão na rede elétrica,

subfrequência ou oscilações na rede elétrica da distribuidora, de forma que provavelmente não foram alcançados os parâmetros mínimos para o microinversor começar a gerar. Seria recomendável realizar o experimento com inversor solar convencional (*string inverter*) no lugar dos microinversores.

4.3. Avaliação do Desempenho do Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar Comparativamente ao Sistema Fotovoltaico Fixo

A partir da coleta de dados dos experimentos realizados, obteve-se a geração de energia elétrica no Sistema Fotovoltaico com Rastreador de Um Eixo (Figura 41) e a energia produzida no Sistema Fotovoltaico Fixo (Figura 42).

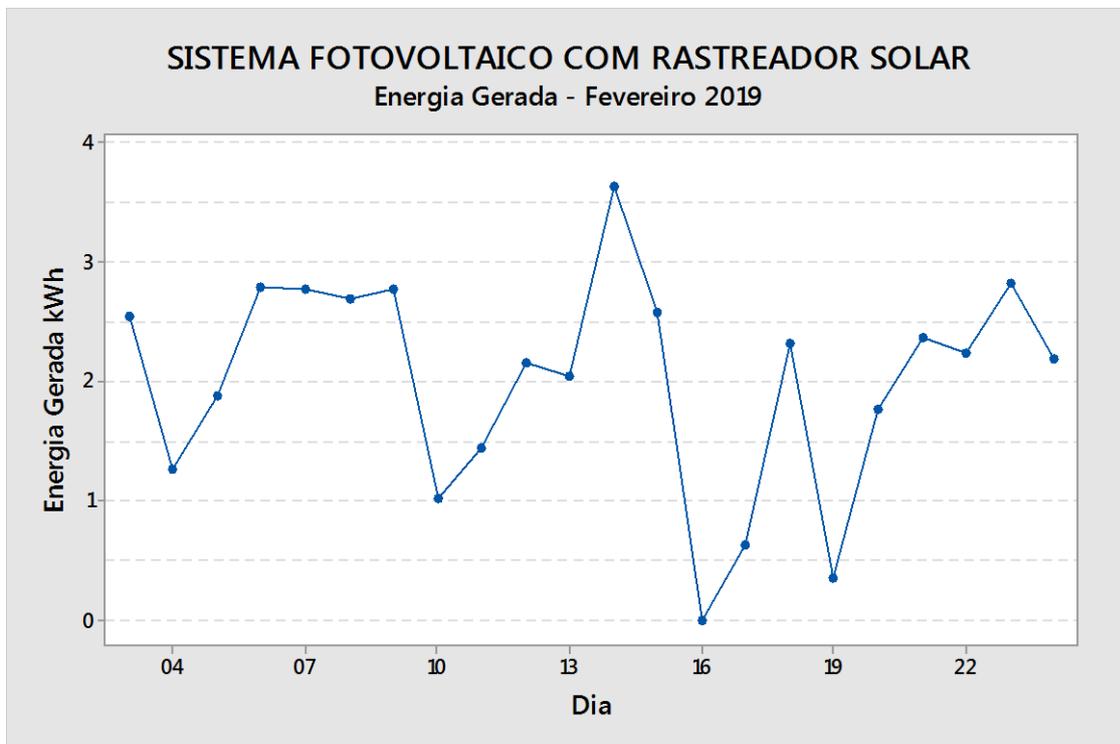


Figura 41 – Geração de Energia no Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar

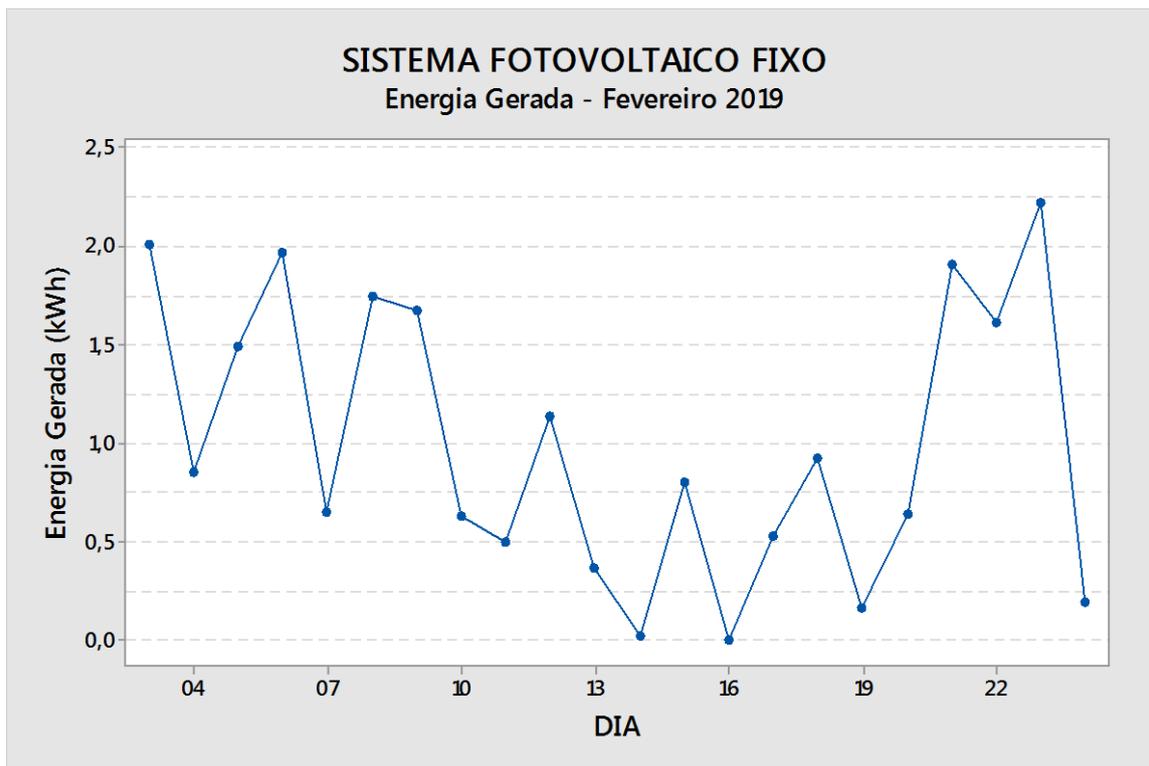


Figura 42 Geração de Energia no Sistema Fotovoltaico Fixo

Na Figura 43, é apresentada a comparação da geração nos dois Sistemas Fotovoltaicos.

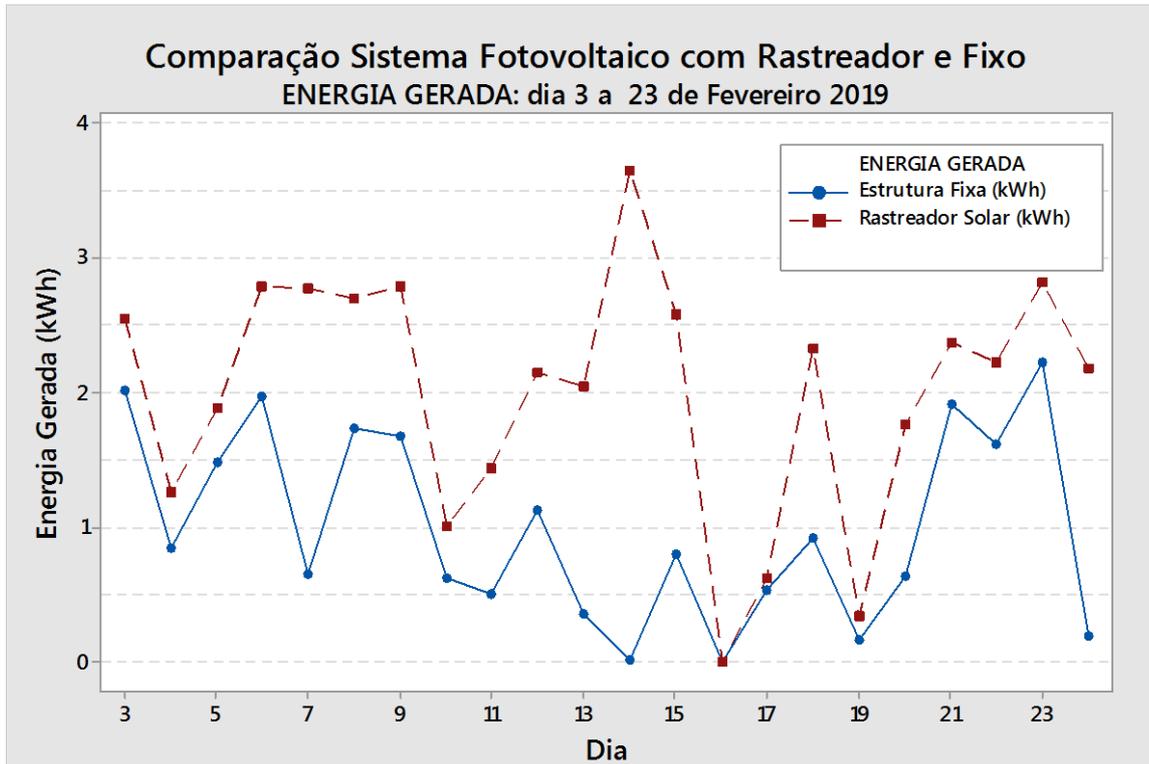


Figura 43 – Comparação Energia Gerada em Sistema Fotovoltaico com Rastreador e Fixo

Pode-se observar que, nos dias chuvosos, ocorreu uma geração muito pequena em ambos os sistemas fotovoltaicos, como se observou no dia 13. Foi possível perceber que a geração de energia no SFV com Rastreador Solar foi de 360 Wh e no SFV Fixo foi de 2040 Wh. Portanto, identificou-se que em momentos com condições climáticas adversas, como dias nublados e chuvosos, o aumento na geração do SFV com Rastreador em relação ao SFV Fixo costuma ser pequeno, da ordem de menos de 15%.

No entanto, em dias de sol pleno, sem nuvens, a geração no SFV com rastreador pode ser até 30% maior que no SFV Fixo, como identificado no dia 23 de fevereiro de 2019, quando a geração no SFV com rastreador foi de 2.820 Wh enquanto no SFV Fixo foi de 2.220 Wh. Neste dia, o sistema com rastreador gerou 600Wh a mais que o fixo, representando um aumento de 27,03% na produção de energia.

4.4. Avaliação da Energia Consumida pelo Motor do Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar

A energia consumida pelo motor elétrico monofásico do Sistema Fotovoltaico com Movimentação em Um Eixo foi registrada durante todo o experimento (Figura 44) obtendo-se um consumo total de 440 Wh de energia, que representa aproximadamente 5% da energia adicional gerada. Ou seja, de toda a energia que foi gerada a mais, a vigésima parte desta energia foi utilizada para realizar a movimentação (energia gasta) e 95% desse excedente foi efetivamente disponibilizado para o produtor.

A Figura 44 exibe a tela do aplicativo *EWELINK*, que indica o consumo de energia do motor registrado pelo medidor de energia SONOFF POW, fabricante ITEAD.



Figura 44 –Consumo de Energia do Motor Elétrico do Rastreador Solar de Um Eixo

4.5. Avaliação de Geração

Desde a conexão com a rede da concessionária, foram registrados os dados de geração diária de energia e percebeu-se que o Sistema Fotovoltaico com Rastreador de Um Eixo obteve uma geração média de energia elétrica maior que o Sistema Fotovoltaico Fixo.

Além disso, notou-se que o Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar de Um Eixo desenvolvido apresentou um custo relativamente baixo se comparado com o valor do sistema fotovoltaico como um todo (painéis, inversores, materiais elétricos, projeto e instalação). Em dias de sol, a geração no SFV com rastreador foi até 30% superior do que o SFV Fixo. Entretanto, nos dias chuvosos e nublados o incremento na geração do SFV com Rastreador foi inferior a 15%.

Destaca-se que o dia 19 de fevereiro de 2019 se caracterizou como muito chuvoso e a geração no SFV com Rastreador foi 620Wh, enquanto a geração no SFV Fixo foi de 530Wh. Logo, a diferença registrada foi de 90 Wh, que representa 16,98% a mais de geração.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que o uso de Sistemas Fotovoltaicos com Rastreador Solar de Um Eixo trouxe maior fornecimento de energia por parte do Sistema Fotovoltaico, pois aumentou em até 30% a geração em dias de sol e acrescentou até 15% em dias nublados ou com chuva. Além disso, o SFV com Rastreador de Um Eixo apresentou um menor valor de Coeficiente de Variação (CV) o que define o sistema como mais estável, ou seja, com menor variação no fornecimento de energia.

A grande limitação do uso da tecnologia do rastreador solar de um eixo não é o custo, mas sim a disponibilidade de espaço para realizar a instalação, uma vez que essa precisa de espaços consideráveis, bem como o montante de energia produzida a mais gera um grande retorno econômico, o que paga os custos do sistema em um curto período de tempo.

Portanto, há uma grande possibilidade de utilização de Sistemas Fotovoltaicos com Rastreador de Um Eixo em sistemas de grande escala como em usinas fotovoltaicas de solo, indústrias e produtores rurais (que geralmente possuem disponibilidade de espaço físico). Contudo, mesmo para consumidores comerciais e residenciais, é uma alternativa interessante e viável economicamente se houver área disponível no solo ou no telhado, desde que o telhado do estabelecimento seja de laje.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 10899 - **Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**, 1º Projeto de Revisão. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2013.

ABNT. NBR 11704 – **Sistemas Fotovoltaicos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração. Fonte de Energia exploradas no Brasil. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>> Acesso em: 02 mai. 2017.

AHMAD, M. J.; TIWARI, G. N. **Solar Radiation Models – A Review**. *International Journal Of Energy Research*. Vol. 35, 2011, p. 271-290.

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos conectados à Rede**. Dissertação (Mestrado em Energia) – USP, São Paulo-SP, 2012.

ASSUNÇÃO, H. D. **DEGRADAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO INSTALADOS NO DEE - UFC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – UFCE, Fortaleza-CE, 2014.

BERMANN, Célio. Crise ambiental e as energias renováveis. *Ciência e Cultura*, v. 60, n. 3, p. 20-29, 2008.

BEZERRA, Filomena Nádia Rodrigues. **Sustentabilidade da matriz energética Brasileira**. 2016.

BRAUN-GRABOLLE, P. **A Integração de Sistemas Solares Fotovoltaicos em Larga Escala no Sistema Elétrico de Distribuição Urbana**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis-SC, 2010.

CARVALHO, P. C. M.; RIFFEL, D. B.; FREIRE, C.; MONTENEGRO, F.F.D. The Brazilian Experience with a Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant. **Progress in photovoltaics: Research and Application**, v. 12, n. 5, 2004, p. 373-385.

CATARIUS, A.; CHRISTINER, M. **Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker**. Dissertação (Qualificação de Mestrado em Ciências) – UFSC, Florianópolis-SC, 2010.

CHIKATE, B. V.; SADAWARTE, Y. A. The Factors Affecting the Performance of Solar Cell. **International Journal of Computer Applications**. International Conference on Quality Up-gradation in Engineering, Science and Technology, 2015, p. 5.

CRESESB. **Energia Solar – princípios e Aplicação**. Centro de Referência para energia solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2006.

CRESESB - Centro de Referência para energia solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. SUNDATA 2017. Disponível em: <<http://www.creseseb.cepel.br/sundata/index.php>> Acesso em 21 de janeiro de 2019.

FISCH, L. B. K.; MOREIRA, C. J. M.; BARATIERI, C. L.; STANKIEWICZ, A. L. **Modelagem Matemática das Curvas V-I de um Painel Fotovoltaico Aplicando a Identificação de Sistemas**. Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2017. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, vol 6, 2017, p. 2.

FRAUNHOFER INSTITUTE. **Photovoltaics Report**. Disponível em: <http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>. Acesso em 12 jul. 2018.

GREGG, A.; PARKER, T.; SWENSON, R. **A “Real World” Examination of PV System Design and Performance.** IEEE's 31st Photovoltaic Specialists Conference and Exhibition, 2005.

HOFFMANN, F. M.; MOLZ, R. F.; KOTHE, J. V.; NARA, E. O. B.; TEDESCO, L. P.C. Monthly Profile Analysis Based on a Two-Axis Solar Tracker Proposal For Photovoltaic Panels. **Renewable Energy**, vol. 115, 2018, p. 750-759.

IBRAHIM, A. Effect of Shadow and Dust on the Performance of Silicon Solar Cell. **Journal of Basic and Applied Scientific Research**, 2011, p. 222-230.

IEA PVPS. Instantâneos de mercados fotovoltaicos globais e relatórios de tendências. Disponível em: <<http://www.iea-pvps.org>>. Acessado em: em 29 de abril de 2017).

IEA. **ELECTRICITY INFORMATION: OVERVIEW** (2017 edition) França, 2018. International Energy Agency – IEA. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElectricityInformation2017Overview.pdf>>. Acesso: 05 jul 2018.

International Energy Agency (IEA). **Snapshot of global photovoltaic markets.** Mary Brunisholz, IEA PVPS, 2017. Disponível em: < http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2017.pdf>. Acesso em: 0 jul.2018

IQBAL, M.; **An Introduction to Solar Radiation.** Ontario CA: Academic Press, 1983. 408 p.

KHALID, A. M.; MITRA, I.; WARMUTH, W.; SCHACHT, V. Performance Ratio – Crucial Parameter for Grid Connected PV Plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 65. 2016, p. 1139–1158.

KALOGIROU, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, 2009.

KEMERICH, P.D.C.; FLORES, C. E. B.; BORBA, W. F.; FRANÇA, J. R.; SILVEIRA, R. B.; LEVANDOSKI, N. D. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, 2016, p. 241-247.

LEE, J. F.; RAHIM, N. A.; AL-TURKI, Y. A. Performance of Dual-Axis Solar Tracker versus Static Solar System by Segmented Clearness Index in Malaysia. **Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Photoenergy** Vol. 2013, 2013, p. 13.

LI, D. H. W.; LOU, S. W.; LAM, J. C. **An Analysis of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation**. The 7th International Conference on Applied Energy, Energy Procedia 75, 2015, p. 388 – 393.

MAGALHÃES, G. E. **Bombeamento de Água Utilizando Sistema Fotovoltaico Autônomo: Um Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – UFMT, Cuiabá-MT, 2016.

MAHARAJA, K.; XAVIER, R. J.; AMLA, L. J.; BALAJI, P. P. Intensity Based Dual Axis Solar Tracking System. **International Journal of Applied Engineering Research**, vol 10, 2015, p. 19457-19465.

MARQUES FILHO, E. P.; OLIVEIRA, A. P.; VITA, W. A.; MESQUITA, F. L. L.; CODATO, G.; ESCOBEDO, J. F.; CASSOL, M.; FRANÇA, J. R. A. Global, diffuse and direct solar radiation at the surface in the city of Rio de Janeiro: Observational characterization and empirical modeling. **Renewable Energy**, Elsevier, vol. 91, 2016, p. 64-74.

MARTIN, N.; RUIZ, J. M. Calculation of the PV Modules Angular Losses Under Field Conditions by Means of an Analytical Model. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, vol. 70, 2001, p. 25-38.

MEREDDY, D.; RAJU, V. R.; SADULA, T. Smart Dual Axes Solar Tracking. **International Conference on Energy Systems and Applications**, 2015, p. 370-374.

MONDOC, B.; POP, F. **Factors Influencing the Performance of a Photovoltaic Power Plant**. 3rd International Conference on Modern Power Systems, 2010, p.6.

NASA, National Aeronautics and Space Administration. **Solar Irradiance**. Disponível em: <<http://www.nasa.gov>>. Acesso em: 01 Ago. 2018.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Sun 101**. Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.com/science/space/solar-system/the-sun/>>. Acesso em: 03 ago. 2018.

NEOSOLAR. **Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e seus Componentes**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>. Acesso em: 05 Ago. 2018

NREL. **National Renewable Energy Laboratory**. Disponível em <<https://www.nrel.gov/>>. Acesso em: 01 Ago. 2018.

OLIVEIRA FILHO, K. S., SARAIVA, M. F. O. **O Sol – A Nossa Estrela**. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>> Acesso em: 03 Ago. 2018.

RAJ, A.; GUPTA, M.; PANDA, S. **Design Simulation and Performance Assessment of Yield and Loss Forecasting for 100 KWp Grid Connected Solar PV System**. 2nd International Conference on Next Generation Computing Technologies, 2016, p. 528-533.

REYSA, G. **Built it Solar**. The Renewable Energy site for Do-it-Yourselfers. Disponível em: <<https://www.builtitsolar.com/Experimental/PVShading/PVShading.htm>>. Acesso em: 01 Ago. 2018.

ROCHA, M. A. M. **Tecnologias de Geração de Energia Solar. Relatório de Estágio no âmbito do Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente**. Porto, 2015.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. p. 530.

SANTOS, D. B.; PEÃO, D. B. M. A; FERREIRA, E. R. **Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede: Estudo de Viabilidade Econômica na Utilização em um Site de Telecomunicações**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações) – IFF, Campos dos Goytacazes – RJ, 2017.

SEME, S.; STUMBERGER, G.; VORSIC, J. **Maximum Efficiency Trajectories of a Two-Axis Sun Tracking System Determined Considering Tracking System Consumption**. IEEE Transactions On Power Electronics, vol. 26, 2011, p. 1280-1290

MUSTAFA, F. I.; SHAKIR, S.; MUSTAFA, F. F.; NAIYF, A. T. **Simple Design and Implementation of Solar tracking System Two Axis with Four Sensors for Baghdad city**. The 9th International Renewable Energy Congress, 2018, p. 5.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos, O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligadas à Rede Elétrica Pública**. LABSOLAR Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.

SAFAN, Y. M.; SHAABAN, S.; EL-SEBAH, M. I. **Hybrid Control of A Solar Tracking System Using SUI-PID Controller**. Sensors Networks Smart and Emerging Technologies, 2017, p. 4.

SIDAWI, J.; ABBOUD, N.; JELIAN, G.; HABCHI, R.; SALAME, C. **Evaluation of the electrical properties under extreme stress in photovoltaic solar modules**. Microelectronics International, 28(1), 2011, p. 12-16.

SOUZA, M. A.; SOUZA, M. L.; CALHEIROS, O. M.; RODY, H. A. **Análise de Viabilidade Econômica Para a Captação Energia Limpa Fotovoltaica**. Projectus, vol 1, 2016, p. 54-63.

STROSKI, P. N. **Como painéis solares fotovoltaicos funcionam? (Parte 2)**. Disponível em: < <http://www.electricalibrary.com/2017/07/31/como-paineis-solares-fotovoltaicos-funcionam-parte-2/>>. Acesso em: 01 Ago. 2018.

TONIN, F. S. **Caracterização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica na Cidade de Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UTFPR, Curitiba-PR, 2017.

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. **Meio Século de História Fotovoltaica**. Revista Gazeta da Física, vol 29, 2006, p. 10-15.

XU, R.; NI, K.; HU, Y.; SI, J.; WEN, H.; YU, D. **Analysis of the Optimum Tilt Angle for a Soiled PV Panel**. Energy Conversion and Management, vol 148, 2017, p. 100–109.

WU, J.; CHEN, X.; WANG, L. **Design and Dynamics of a Novel Solar Tracker With Parallel Mechanism**. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, vol. 21, 2016, p. 88-97.

WU, J.; CHEN, X.; WANG, L. **Optimum Design and Performance Comparison of a Redundantly Actuated Solar Tracker and its Nonredundant Counterpart**. **Solar Energy**, vol. 127, 2016b, p. 36-47.

ZAHEDI, A. Solar Photovoltaic (PV) Energy; Latest Developments in the Building Integrated and Hybrid PV Systems. **Renewable Energy**, vol 31, 2006, p. 711–718.

ZAKARIAH, A.; FARAMARZI, M.; JAMIAN, J. J.; YUNUS, M. A. M. Medium Size Dual-Axis Solar Tracking System With Sunlight Intensity Comparison Method and Fuzzy Logic Implementation. **Jurnal Teknologi**, 2015, p. 145-157.