

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RICARDO ALVES SCALON

**ANÁLISE COMPARATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO ESTÁTICO E COM RASTREAMENTO SOLAR NO MUNICÍPIO
DE SANTIAGO-RS.**

Alegrete - RS

2022

RICARDO ALVES SCALON

ANÁLISE COMPARATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE UM SISTEMA FOTVOLTAICO ESTÁTICO E COM RASTREAMENTO SOLAR NO MUNICÍPIO DE SANTIAGO-RS.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de **Bacharel em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Chrystian Dalla Lana da Silva.

Alegrete - RS

2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

R488 Scalon, Ricardo

ANÁLISE COMPARATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO ESTÁTICO E COM RASTREAMENTO SOLAR NO MUNICÍPIO
DE SANTIAGO-RS / Ricardo Scalon.

58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2022.

"Orientação: Chrystian Silva".

1. Fontes de energia alternativas. 2. Rastreamento solar.
3. Energia solar fotovoltaica. 4. Energia solar. I. Título.

RICARDO ALVES SCALON

**ANÁLISE COMPARATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ESTÁTICO E
COM RASTREAMENTO SOLAR NO MUNICÍPIO DE SANTIAGO-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 11 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Eduardo Machado Dos Santos
UNIPAMPA

Prof. Dr. Alessandro Botti Benevides
UNIPAMPA

Assinado eletronicamente por **ALESSANDRO BOTTI BENEVIDES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/03/2022, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as



normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CHRYSIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/03/2022, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/03/2022, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0749691** e o código CRC **6E553E72**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550

Telefone: (55) 3422-8400

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e minha família, agradeço por todo incentivo e todos os esforços realizados para que essa conquista fosse alcançada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que auxiliaram e contribuíram de alguma forma.

Em especial aos meus pais Luis e Ernestina, e as minhas irmãs Micheli e Andrielli, que a todo momento acreditaram no meu potencial e em momento algum mediram esforços para a realização deste ciclo.

À minha namorada Roberta, pelo apoio afetivo e emocional, pelo incentivo e colaboração.

Ao amigos e colegas que conheci durante o todo o curso.

Ao meu orientador, professor Chrystian, pelo auxílio durante elaboração deste trabalho. Muito obrigado!

Agradeço a Unipampa, a todos os professores e servidores que tiveram grande importância no aprendizado e estrutura.

“Para ter sucesso, o seu desejo de sucesso deve ser maior que o seu medo do fracasso”.

Bill Cosby.

RESUMO

A utilização de fontes de energia alternativas vem sendo amplamente explorada na busca pela diversidade da matriz energética, impulsionando o emprego de geração de energia limpa e renovável. Dentre as formas de aproveitamento de energias alternativas, destaca-se a energia solar, sendo a mesma uma fonte de energia inesgotável, tanto como fonte de calor como de luz. A energia solar fotovoltaica é uma das principais fontes provenientes da energia solar. No entanto, este tipo de geração de energia é considerada pouco competitiva frente à outras fontes de geração. Na busca por aumentar sua eficiência e, conseqüentemente, torná-la mais atrativa, rastreadores solares vem sendo utilizados aumentando o rendimento dos módulos fotovoltaicos. Nesta dissertação, é realizado um estudo comparativo entre um sistema fotovoltaico fixo e outro com rastreamento solar de dois eixos, instalados na cidade de Santiago/RS. Inicialmente, são relatados conceitos relacionados à energia solar e tipos de rastreadores solares. Em seguida, descrevem-se os materiais utilizados nos dois sistemas fotovoltaicos propostos. Por fim, foram executadas as análises de comparação entre o sistema fixo e móvel.

Palavras-Chave: Fontes de energia alternativas, rastreamento solar, energia solar fotovoltaica, energia solar

ABSTRACT

The use of alternative energy sources has been widely explored to search for the diversity of the energy matrix, boosting the use of clean and renewable energy generation. of inexhaustible energy, both as a source of heat and light. Photovoltaic solar energy is one of the main resources of solar energy, however this type of energy generation is considered uncompetitive compared to other generation sources. In the quest to increase its efficiency and consequently make it more attractive, solar trackers have been used to increase the income of photovoltaic modules. In this dissertation, a study will be implemented to compare a fixed photovoltaic system and another with two-axis solar tracking, installed in the city of Santiago/RS. Initially, concepts related to solar energy and types of solar trackers are reported. Next, the materials used in the two proposed photovoltaic systems are described. Finally, the comparison analyzes between the fixed and mobile system were performed.

Keywords: Alternative energy sources, solar tracking, photovoltaic solar energy, solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Órbita da Terra em torno do Sol e as estações do ano no hemisfério Sul.	23
Figura 2 - Declinação Solar (δ) em quatro posições da Terra ao longo do ano.	24
Figura 3 - Ilustração dos ângulos θ_Z e γ_s , representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal.	26
Figura 4 - Ilustração da orientação da superfície inclinada em relação ao mesmo plano, ângulos β , γ , γ_s e θ	26
Figura 5 - Componentes da radiação solar.	28
Figura 6 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.	30
Figura 7 - Curva característica I-V e curva de potência P-V de um módulo FV.	32
Figura 8 - Variação da radiação solar sobre a curva I-V de um módulo FV.	33
Figura 9 - Variação de temperatura nas células sobre a curva I-V.	34
Figura 10 - Rastreador Solar de um eixo.	36
Figura 11 - Rastreador Solar de Eixo Horizontal.	37
Figura 12 - Rastreador de Eixo Duplo.	38
Figura 13 - Irradiação Solar no Plano Horizontal em Santiago/RS.	40
Figura 14 - Irradiação Solar no Plano Inclinado em Santiago/RS.	41
Figura 15 - Módulo Fotovoltaico Utilizado.	43
Figura 16 - Dispositivos Eletrônicos Utilizados no Experimento.	44
Figura 17 - Disposição dos LDRs no Dispositivo Eletrônico.	45
Figura 18 - Sensores Fim de Curso Utilizados.	45
Figura 19 - Motor de Passo 12 V.	46
Figura 20 - Wattímetro Digital DC.	47
Figura 21 - Inclinação e Orientação Geográfica dos Módulos Fixos.	48
Figura 22 - Sistema de mobilidade do Eixo Vertical.	49
Figura 23 - Atuador Vertical.	49
Figura 24 - Disposição da Conexão dos Componentes do Sistema.	50
Figura 25 - Comparativo de Geração de Energia do Sistema Fixo com o Móvel no dia 15/02/2022.	54
Figura 26 - Comparativo de Geração de Energia do Sistema Fixo com o Móvel no dia 16/02/2022.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Irradiação Solar Média Mensal no Plano Horizontal e nos Planos Inclinados em 29° e 23° em Santiago/RS.....	41
Tabela 2 - Características técnicas do módulo utilizado.	42
Tabela 3 - Consumo médio dos motores atuadores do sistema móvel.....	46
Tabela 4 - Características técnicas da Fonte de Alimentação.....	47
Tabela 5 - Custos dos equipamentos e materiais utilizados no sistema estático.	51
Tabela 6 - Custos dos equipamentos e materiais utilizados no sistema móvel.....	52
Tabela 7 - Desempenhos dos Sistemas Fotovoltaicos.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DC	Corrente contínua
FV	Fotovoltaico
I-V	Corrente x Tensão
LDR	Resistor Dependente da Luz
P-V	Potência x Tensão
STC	Condições Padrão de Teste
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido
Wp	Watt-Pico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações Gerais.....	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Justificativa.....	18
1.4 Revisão Bibliográfica	19
1.5 Estrutura do Trabalho	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Considerações Gerais.....	21
2.2 Energia Solar	21
2.3 Geometria Sol-Terra	22
2.3.1 Ângulos da Geometria Solar	25
2.4 Radiação Solar	27
2.5 Energia Solar Fotovoltaica	28
2.5.1 Efeito Fotovoltaico	29
2.5.2 Tipos de Células Fotovoltaicas.....	30
2.6 Módulos Fotovoltaicos	31
2.6.1 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos.....	31
2.6.1.1 Efeito da Intensidade de Radiação Solar Incidente sobre um Módulo Fotovoltaico	33
2.6.1.2 Efeitos da variação de temperatura sobre a curva característica I-V	33
2.7 Rastreadores Solares.....	35
2.7.1 Classificação dos Rastreadores Solares	35
2.7.1.1 Rastreadores Solares de um Eixo	35
2.7.1.2 Rastreadores Solares de Eixo Horizontal	36
2.7.1.3 Rastreadores Solares de dois Eixos.....	37
2.8 Considerações Finais	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Considerações Gerais.....	39
3.2 Descrição do Sistema Experimental.....	39

3.3 Caracterização do Local	39
3.4 Especificações Técnicas dos Materiais Utilizados	42
3.4.1 Módulos Fotovoltaicos	42
3.4.2 Hardware	43
3.4.2.1 Sensor de Luminosidade.....	44
3.4.2.2 Sensor de Fim de Curso	45
3.4.3 Atuadores.....	46
3.4.4 Fonte de Alimentação	46
3.4.5 Medidor de Energia	47
3.5 Caracterização dos Métodos Aplicados.....	47
3.5.1 Desenvolvimento do Sistema com Rastreador Solar.....	48
3.5.1.1 Sistema Elétrico de Montagem	50
3.6 Custos dos Equipamentos	50
3.7 Considerações Finais	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1 Análise de Geração	53
4.2 Ganhos Relativos Percentuais de Geração	54
5 CONCLUSÃO	56
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	56
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A demanda e necessidade por energia elétrica está aumentando expressivamente no mundo todo, principalmente, por conta do elevado desenvolvimento tecnológico e crescimento populacional mundial. Na busca para tentar suprir essa demanda de energia, e levando em conta a preservação do meio ambiente, surge a importância da pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas para geração de energia (PINHO; GALDINO, 2014).

Dentre as formas de aproveitamento de energia limpa e renovável a energia solar se destaca. A geração de energia elétrica vinda da radiação solar oferece muitas vantagens, como a atenuação dos impactos ambientais, matriz energética mais diversificada e diminuição do emprego de combustíveis fósseis. Com a utilização deste tipo de energia oriunda do sol, é possível gerar energia elétrica em regiões remotas e de difícil acesso onde não há atendimento de rede pública de energia, proporcionando uma melhor qualidade de vida dos residentes desse tipo de região (SILVA, 2012).

A energia fotovoltaica vem crescendo aceleradamente nos últimos anos e está entre as gerações de energia solar mais utilizadas. Este tipo de energia é gerada por meio da conversão direta da radiação solar em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014).

Este tipo de geração de energia tornou-se amplamente utilizada por trazer diversos benefícios, como geração de energia renovável, não realizando emissão de gases de efeito estufa, baixa manutenção de equipamentos, reduzido espaço de geração, fácil instalação e podendo ser instalados em áreas isoladas que não tenham acesso a rede elétrica (VIEIRA, 2014).

Entretanto, ainda existem alguns empecilhos quanto ao total emprego da geração de energia fotovoltaica. Entre os principais limitadores da sua utilização, estão o elevado custo de aquisição e baixo rendimento comparado a outras formas de geração de energia, principalmente, em regiões que se localizam afastadas da linha do Equador, tornando-se fundamental explorar maneiras de otimização e

eficiência dos módulos solares. Nesse contexto, estudos vêm sendo implementados com a utilização de rastreadores solares para conseguir o máximo rendimento. Esses dispositivos têm a função de direcionar de forma automatizada os módulos fotovoltaicos na orientação do sol, fazendo com que a superfície dos módulos situe-se perpendicular aos raios solares, assim, aumentando a captação da radiação solar ao longo do ano, obtendo uma maior eficiência do sistema de geração e, conseqüentemente, elevando a geração de energia.

Ainda assim, é fundamental realizar estudos e análises prévias da região de instalação para avaliar se a técnica aplicada proporcionará o aumento de geração de energia elétrica aceitável para o sistema. Deve-se observar e avaliar as condições como latitude do local, irradiância solar, temperatura média e nível de nebulosidade anual.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise comparativa entre um sistema fotovoltaico estático com inclinação ideal para a latitude do local e um sistema com rastreador solar de dois eixos, visto que, como a posição do sol varia a cada instante, a radiação solar no plano horizontal para um plano inclinado também se altera.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, citam-se:

- Construir um sistema capaz de realizar o rastreamento solar diário;
- Instalar os dois sistemas fotovoltaicos a serem analisados e comparados;
- Controlar o processo de rastreamento solar e de geração de energia;

- Comparar e avaliar o sistema fotovoltaico com rastreador solar em relação ao sistema estático.

1.3 Justificativa

Embora a matriz elétrica brasileira estar evoluindo para uma maior diversificação, investindo em fontes renováveis de energia, o setor elétrico do país encontra-se vivenciando uma crise atualmente. Isso porque a maior parte da energia elétrica produzida é proveniente de usinas hidrelétricas, necessitando totalmente de recursos hídricos, que é intensamente suscetível às condições climáticas. O baixo nível de água nas represas e reservatórios, oriunda da escassez de chuvas, tem impactado diretamente na geração de energia elétrica, não sendo capaz de suprir a demanda que tem se elevado gradativamente no país (PINHO; GALDINO, 2014).

Dentre as formas de aproveitamento da energia solar, a energia fotovoltaica está se tornando uma das mais favoráveis atualmente, com um grande potencial a ser explorado, principalmente, no território brasileiro, que tem o potencial solar abundante, pelo motivo de estar localizado entre os trópicos (VIEIRA, 2014).

No entanto, esse tipo de sistema de geração ainda tem sua eficiência consideravelmente baixa, fazendo-se necessária uma procura por maneiras de otimização, elevando seu rendimento e, conseqüentemente, tornando mais vantajosa sua aplicação em relação a outras fontes renováveis de energia.

Um dos métodos para aumentar o rendimento dos sistemas fotovoltaicos é a utilização de rastreadores solares.

Diante do exposto, uma análise comparativa entre um sistema fotovoltaico estático e um que faz uso de um sistema de rastreamento, na cidade de Santiago/RS, apresenta-se então como uma pesquisa relevante, visto o baixo rendimento do sistema e o distanciamento do local em relação a linha do Equador.

1.4 Revisão Bibliográfica

Este tópico tem como objetivo sintetizar alguns artigos e teses sobre o tema proposto, os quais foram de suma importância para a elaboração e compreensão do trabalho. Alguns são citados a seguir.

Castañeda (2011) propôs a elaboração de um modelo empírico baseado em um rastreador solar passivo movimentado ao longo do dia pela ação da radiação incidente. A abordagem utilizada foi da transferência de massa de um fluido pressurizado, contido em dois vasos iguais, ambos interligados, criando a capacidade de movimentação sobre um eixo central do sistema, movimentando-se lentamente com a mudança da posição do Sol ao longo do dia.

Freitas (2008) desenvolveu o protótipo de um seguidor solar para painéis fotovoltaicos com dois graus de liberdade. Para determinar o ganho obtido com o uso de sistemas móveis em comparação com sistemas fixos o autor utilizou o modelo teórico Perez et Al, que apresentou ganhos em torno de 15% para o protótipo.

Gasparin (2009) apresentou em sua dissertação de mestrado o desenvolvimento de um sistema para traçar a curva característica I-V de módulos fotovoltaicos, com o sistema possuindo uma fonte de quatro quadrantes para polarização do módulo, multímetros para medida simultânea de tensão e corrente formando pares I-V da curva característica.

Vieira (2014) realizou, em sua dissertação de mestrado, um estudo comparativo entre um painel solar fotovoltaico estático e um painel com mobilidade em um eixo, instalados na cidade de Mossoró/RN, realizando a análise de funcionamento e estudo comparativo de desempenho do sistema estático e o móvel.

Silva (2012) comparou o desempenho de um painel solar fotovoltaico fixo e um móvel com movimentação em um eixo, instalados na cidade de Braga, Portugal. O controle de rastreamento foi feito através de um sistema astronômico, prevendo anteriormente a movimentação do Sol. O aumento da produção de energia no sistema móvel foi de até 60% comparado com o sistema fixo.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este Trabalho está dividido em cinco Capítulos, com seus respectivos subtítulos, conforme abaixo.

- O capítulo 1 mostrou a introdução, com uma consideração geral do tema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa para o tema, e uma revisão bibliográfica sobre o assunto.
- No Capítulo 2, é demonstrada a fundamentação teórica sobre o assunto, com uma consideração geral sobre energia solar, movimentos da Terra em torno do Sol, ângulos da geometria solar, radiação solar, efeitos fotovoltaicos, energia solar FV, características elétricas de um módulo FV e, por fim, os rastreadores solares, com suas definições e tipos.
- No Capítulo 3, são abordadas os materiais e métodos utilizados para realização do experimento.
- No Capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos entre ambos os sistemas de geração fotovoltaica.
- No Capítulo 5, apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.
- Ao final, são apresentadas as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Gerais

Na busca por um maior rendimento nos módulos fotovoltaicos, considerados com baixa eficiência, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas na área, com o objetivo de manter a superfície dos módulos posicionadas na direção do Sol, aumentando a radiação solar que incide sobre a mesma. É fundamental a pesquisa e entendimento de todos os fatores que possibilitam auxiliar na busca por resultados com êxito.

Esta Seção apresenta o embasamento teórico, abordando primeiramente os conceitos relacionados à energia solar e as propriedades resultantes do movimento da Terra em torno do Sol, com as características de comportamento e relações geométricas, são denotados, também, os efeitos fotovoltaicos, juntamente com seus diferentes tipos de células. Ainda, são abordadas as características elétricas de um módulo fotovoltaico e suas consequências causadas pela radiação solar e variação de temperatura. Por fim, são relatados os modelos de rastreadores solares existentes e suas principais características e funções.

2.2 Energia Solar

Energia solar corresponde à energia do sol, emitida para Terra de duas formas: energia térmica e energia luminosa. A radiação solar, proveniente da energia luminosa, constitui-se de uma inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, fonte de energia térmica, normalmente utilizada para aquecimento de fluidos e ambientes, bem como para geração de potência mecânica ou elétrica (ANEEL, 2005). Outra forma de aproveitamento é a conversão direta em energia elétrica, através de sistemas fotovoltaicos ou indireta, por meio de sistemas termoeletrônicos.

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos ocorre através de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são mais utilizados em

aplicações domésticas ou comerciais para aquecimento de água. Os concentradores aplicam-se quando há necessidade de elevadas temperaturas como a secagem de grãos e produção de vapor (Vieira, 2014).

Dentre os vários processos de aproveitamento da energia solar, atualmente os mais utilizados no Brasil e no mundo são a tecnologia de aquecimento da água e a geração fotovoltaica de energia elétrica (ANEEL, 2005).

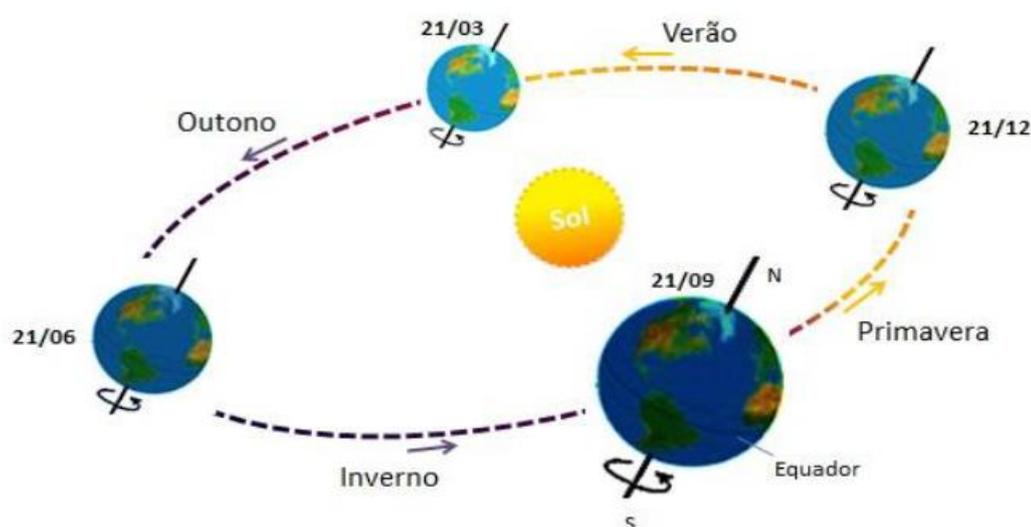
A eficiência destes processos está diretamente ligada à radiação solar incidente na região de aplicação. Portanto, é importante entender o posicionamento do sol ao longo do ano, bem como as condições ambientes que possam a vir interferir no nível de radiação solar.

2.3 Geometria Sol-Terra

A Terra descreve sincronicamente dois movimentos em sua órbita: o movimento de rotação e o movimento de translação. Rotação é o movimento que a Terra descreve ao redor do seu próprio eixo realizando uma volta completa a cada 24 horas. Com isso, realizando uma sensação de dia e noite, gerando a impressão que o Sol move-se diariamente no sentido Leste-Oeste. Na translação, o movimento da Terra é caracterizado por uma órbita elíptica ao redor do Sol durante o total de um ano. Esta trajetória faz com que, em alguns momentos do ano, a radiação solar seja diferente que em outros pela posição da Terra em relação ao Sol. A Figura 1 ilustra o movimento de translação da Terra.

Conforme o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - CRESEB (2014), a Terra descreve em sua trajetória elíptica um plano inclinado de aproximadamente $23,45^\circ$ em relação a linha do Equador. Este ângulo descrito entre o Sol e o plano do Equador, é chamado de declinação solar (δ) e varia entre $-23,45^\circ$ e $+23,45^\circ$ conforme o dia do ano. Admite-se o ângulo positivo ao Norte e negativo ao Sul da linha do Equador. Esta inclinação determina a variação da posição do Sol no horizonte em relação à mesma hora ao longo dos dias e simultaneamente com o movimento de translação dá origem às estações do ano. A Figura 2 ilustra o movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano no hemisfério sul, mostrando a declinação solar da Terra ao longo do ano.

Figura 1 - Órbita da Terra em torno do Sol e as estações do ano no hemisfério Sul.

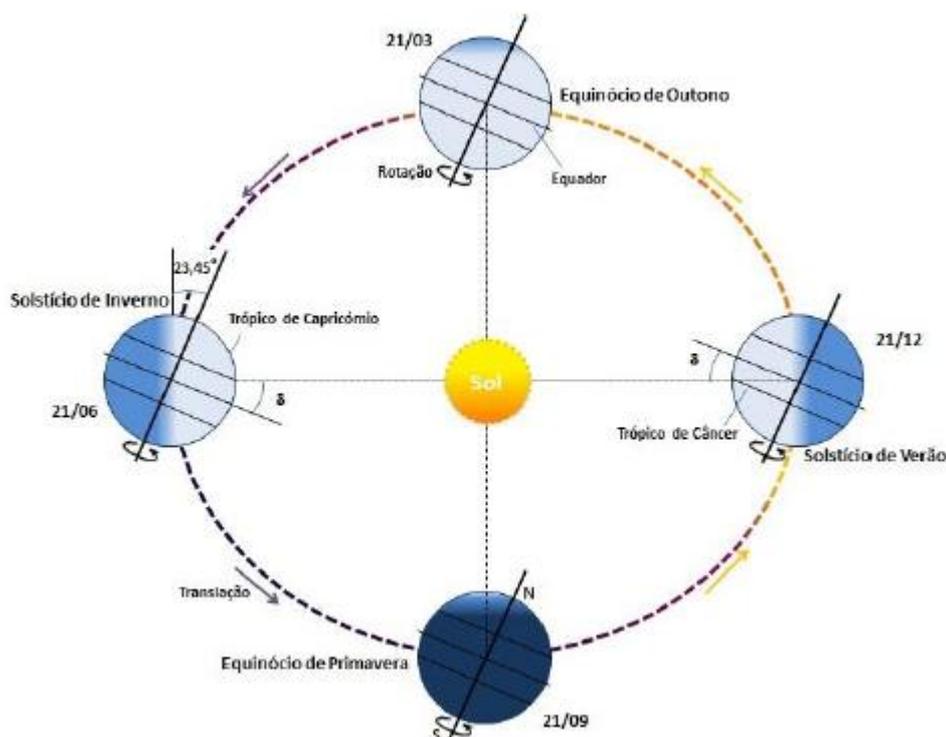


Fonte: (CRESESB, 2014, p.69).

Em virtude do ângulo de declinação solar, que a incidência dos raios solares é diferente nos hemisférios Norte e Sul. Em determinado momento, o hemisfério está mais voltado para o Sol e seis meses depois o hemisfério Norte se localiza mais voltado para o Sol. Quando o ângulo de declinação alcança seu valor máximo, seja $+23,45^\circ$ ou $-23,45^\circ$, ocorre o chamado solstício. Pela declinação solar que se observa o nascer e o pôr-do-sol em diferentes posições ao longo do ano (PINHO; GALDINO, 2014).

No solstício de verão ocorrido na data de 21 de dezembro o Sol está a $+23,45^\circ$ e se torna o dia mais longo do ano, devido ao hemisfério Sul receber a maior incidência de raios solares. Já no solstício de inverno, ocorrido em 21 de junho, o Sol está a $-23,45^\circ$, tornando a noite mais longa do ano pelo fato de receber a menor quantidade de raios solares. Quando o Sol atinge o ponto médio de deslocamento, o ângulo de declinação solar é igual à zero, ocorrendo os chamados equinócios. O equinócio do outono, ocorrido em 21 de março, e o equinócio da primavera, ocorrido em 21 de setembro, acontecem quando, tanto o hemisfério Sul, quanto o hemisfério Norte, recebem a mesma quantidade de raios solares, fazendo com que o dia e a noite tenham a mesma duração (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 2 - Declinação Solar (δ) em quatro posições da Terra ao longo do ano.



Fonte: (CRESESB, 2014, p.70).

Com base na análise dos movimentos de translação e rotação da Terra, é possível concluir que um plano recebe os raios do Sol com ângulos de incidência diferentes, segundo a hora do dia e a época do ano, além de se modificar de acordo com a orientação e a inclinação do plano. Concebe-se que a intensidade da irradiação solar para uma localidade na superfície da Terra está relacionada não somente aos elementos da atmosfera, como também ao ângulo zenital do Sol e à altitude (CRESESB, 2014).

Tendo em vista as condutas para a declinação solar e a latitude, positivas ao Norte e negativas ao Sul do Equador, a discrepância entre a declinação e a latitude, é possível determinar a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade da Terra.

A declinação solar pode ser calculada utilizando-se a Equação 1.

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left[\left(\frac{360}{365} \right) (n - 80) \right] \quad (1)$$

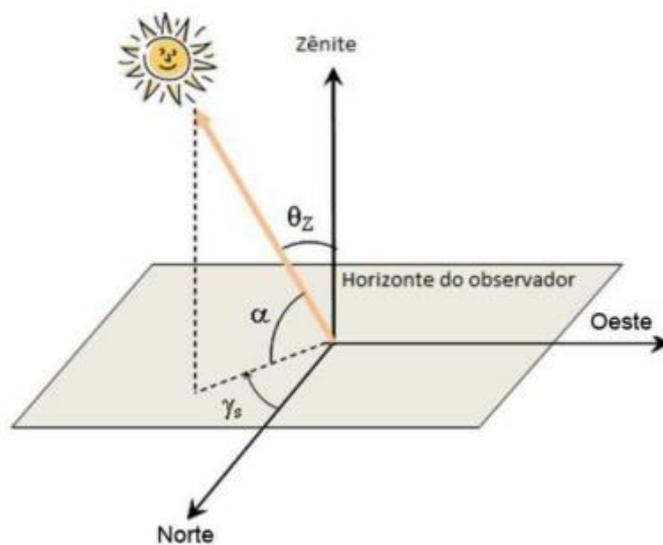
Onde a variável n representa o dia do ano.

2.3.1 Ângulos da Geometria Solar

Para o entendimento do aproveitamento solar para geração de energia, é de grande importância conhecer as relações geométricas determinadas entre os raios solares e a superfície terrestre. Estas relações geométricas são descritas por CRESESB (2014) através de vários ângulos, ilustrados nas Figuras 3 e 4, sendo eles:

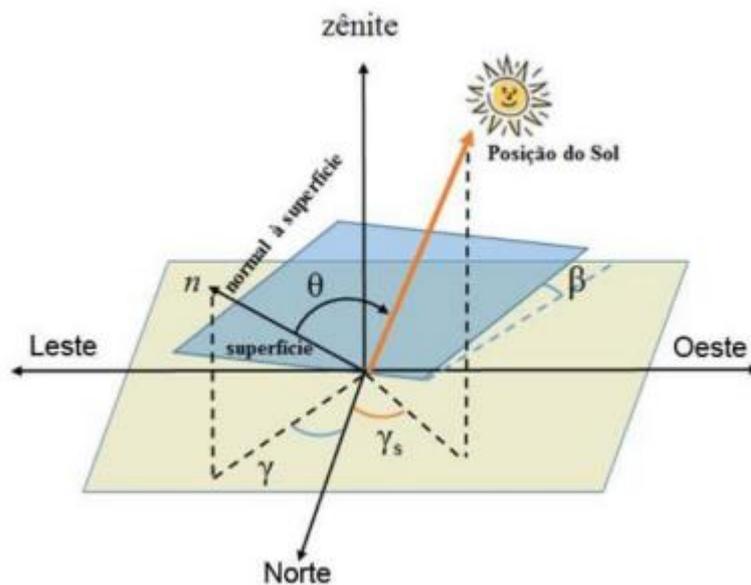
- Ângulo Zenital (θ_z): ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical (Zênite). O ângulo zenital é zero quando ele se encontra exatamente acima do observador;
- Ângulo de altitude Solar (α): ângulo entre os raios Solares e sua projeção sobre o plano horizontal;
- Ângulo Azimutal do Sol (γ_s): também chamado de azimute solar, é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul. O deslocamento angular é tomado a partir do Norte (0°) geográfico, sendo, por convenção, positivo quando a projeção se encontrar à direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (a Oeste). Varia de -180° a 180° .
- Ângulo Azimutal da Superfície (γ): ângulo entre a projeção da normal à superfície e o plano do meridiano local. No Norte é zero, para Leste é positivo e para Oeste é negativo. Varia de -180° a 180° ;
- Inclinação da Superfície de captação (β): ângulo entre o plano da superfície e uma superfície horizontal. Varia de 0° a 90° ;
- Ângulo de incidência (θ): ângulo entre a radiação direta incidente no plano e a normal à superfície.

Figura 3 - Ilustração dos ângulos θ_z e γ_s , representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal.



Fonte: (CRESESB, 2014, p.73).

Figura 4 - Ilustração da orientação da superfície inclinada em relação ao mesmo plano, ângulos β , γ , γ_s e θ .



Fonte: (CRESESB, 2014, p.73).

Um ângulo também importante a ser considerado é o ângulo horário (ω) que, de acordo com Pinho et. al. (2008), é descrito como o ângulo entre o meridiano do Sol e o meridiano do local. O ângulo horário considera todo o intervalo de horas entre o nascer e o pôr-do-sol, sendo negativo pela manhã e positivo à tarde. A Terra demora 24 horas para descrever em seu movimento de rotação uma volta completa que corresponde a 360° . Com isso, cada hora corresponde ao deslocamento de 15° . A Equação 2 permite calcular o ângulo horário a partir da hora solar.

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (2)$$

Onde, t_s é a hora solar em uma escala de 0 a 24.

O entendimento do movimento da Terra e do posicionamento do sol em relação a um determinado local do planeta são fatores importantes para o aumento do rendimento dos módulos fotovoltaicos, e o funcionamento destes será discutido na Seção 2.6.

2.4 Radiação Solar

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030, a irradiação de energia solar por ano na superfície da Terra é suficiente para atender milhares de vezes o consumo anual de energia do mundo (ANEEL apud EPE, 2009).

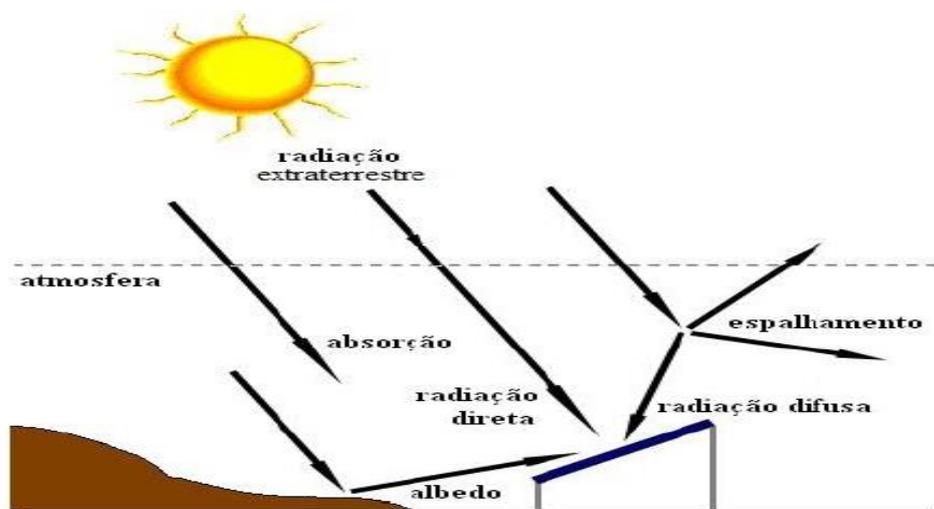
De acordo com (CRESESB, 2014), a densidade média anual de fluxo energético oriundo da irradiação solar corresponde ao valor de 1.367 W/m^2 . Entretanto, esta radiação não atinge de maneira uniforme toda a crosta terrestre. Vários são os fatores que influenciam a radiação solar incidente em uma determinada região, a saber, a latitude, a estação do ano e condições atmosféricas como nebulosidade e umidade relativa do ar.

De toda a radiação solar incidente na atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares nas camadas mais altas. Esta fração que atinge o solo é composta por um feixe, ou radiação direta, e uma parte difusa, ou radiação difusa (CRESESB, 2004).

Segundo Freitas (2008), o nível de radiação na superfície terrestre é aproximadamente 1000 W/m^2 , ao meio-dia, em condições climáticas favoráveis. Esse valor de radiação solar é considerado um valor padrão para dimensionamento de módulos ou células fotovoltaicas.

A Figura 5 demonstra as componentes da radiação solar sobre uma superfície.

Figura 5 - Componentes da radiação solar.



Fonte: (PINHO et al., 2008).

2.5 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade por meio de um processo conhecido como Efeito Fotovoltaico, inicialmente relatado pelo físico francês Edmond Becquerel, em 1839. Trata-se do aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz, possibilitando o surgimento de uma infinidade de estudos relacionados à geração de energia solar (SILVA, 2012).

Inicialmente, o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca de empresas do setor de telecomunicações por fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a “corrida espacial”. A célula solar era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo e peso) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço. Outro uso espacial que impulsionou o desenvolvimento das células solares foi a necessidade de energia para satélites (CRESESB, 2014).

2.5.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores, que se caracterizam pela presença de bandas de energia, onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e da banda de condução “vazia” (sem elétrons), separadas por uma região proibida, chamada de *gap*. Os principais semicondutores utilizados são o silício e o germânio (VIEIRA, 2014).

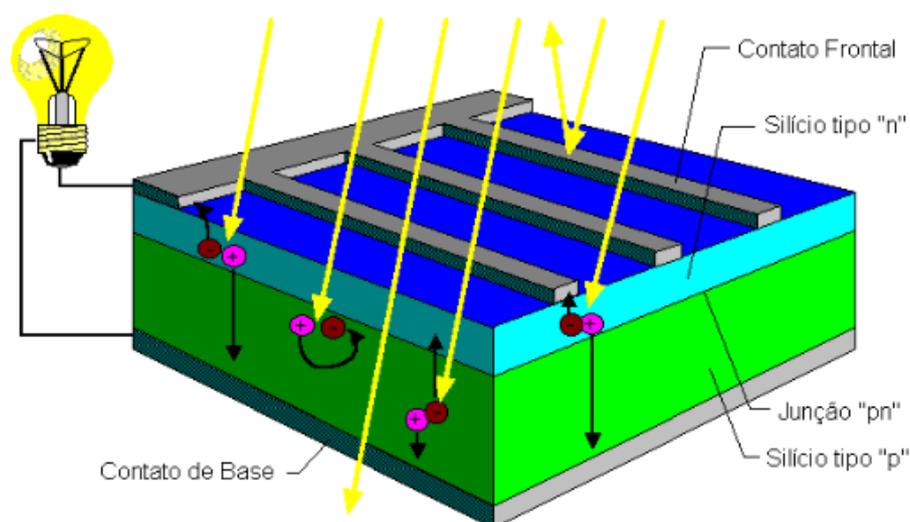
No momento em que a radiação eletromagnética do Sol penetra no semicondutor, os elétrons da banda de valência obtêm energia, ultrapassam o *gap*, alcançando a banda de condução, formando uma corrente elétrica. No momento em que o elétron se move, abre espaço para que outro elétron complete uma lacuna, neutralizando o material novamente (ALCÂNTARA, 2013).

A inclusão de elementos químicos no interior do semicondutor eleva a corrente elétrica. Esse procedimento é conhecido como dopagem. Por exemplo, o fósforo, ao dopar o semicondutor com um elemento pentavalente, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará fracamente ligado a seu átomo de origem (átomo do semicondutor). Isto faz com que o material fique negativamente carregado, com pouca energia térmica, e este elétron se deslocará facilmente da camada de valência, indo para a banda de condução, representando um semicondutor do tipo N. Caso o elemento dopante seja trivalente, o material ficará carregado positivamente, representando um semicondutor do tipo P, pois faltará uma ligação com os átomos do semicondutor (VIEIRA, 2014).

Uma célula fotovoltaica surge através da junção de um semicondutor do tipo N e outro do tipo P. Quando submetidos à radiação solar, os elétrons são energizados, porém, não são capazes de passar da camada N para a camada P. Ao conectar as duas camadas externamente, existirá o fluxo dos elétrons, gerando a corrente elétrica na célula (SILVA, 2012).

A Figura 6 ilustra uma célula fotovoltaica de silício com seus principais elementos; os contatos de ligação são metalizados no processo de fabricação, sendo os frontais (geralmente o terminal negativo) em forma de grade para a passagem de luz solar. Também é aplicada uma cobertura anti-reflexiva sobre a superfície da célula fotovoltaica para reduzir as perdas por reflexão.

Figura 6 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.



Fonte: (CRESESB/CEPEL, 2006, p.13).

2.5.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

Conforme discutido na Seção 2.5.1, normalmente, os materiais semicondutores utilizados nas indústrias são o silício e o germânio. Na fabricação de módulos fotovoltaicos, o mais utilizado entre os semicondutores é o silício, pois é um material mais abundante na Terra e de fácil extração (CASTAÑEDA, 2011).

As células FV de silício, de acordo com seu processo de fabricação, são classificadas em três tipos:

- Silício Monocristalino: Composto por células monocristalinas do silício puro, confeccionadas através do corte de uma fina fatia do silício cristalino. Essa fatia é chamada de *Wafer* (bolacha), tornando sua eficiência superior em relação aos demais tipos (CASTAÑEDA, 2011).
- Silício Policristalino: São produzidas a partir de um aglomerado de pequenos cristais de silício derretidos. Como seu processo de fundição é realizado em blocos, proporcionando um menor custo de fabricação, porém com uma menor eficiência comparado ao silício monocristalino (CASTAÑEDA, 2011).

- Silício Amorfo: Material que não apresenta estrutura cristalina, sendo composto de finas camadas com propriedades semicondutoras, normalmente utilizado em lugares com baixo consumo de energia. Tem baixo custo em seu processo de produção, porém, sua eficiência e vida útil é inferior comparado às células monocristalina e policristalina (CASTAÑEDA, 2011).

2.6 Módulos Fotovoltaicos

O módulo fotovoltaico é o principal componente para geração de energia solar, com a função de converter energia solar em energia elétrica, através do processo abordado na Seção 2.5.1, sendo composto por um conjunto de células fotovoltaicas interligadas entre si, conectadas em série e/ou paralelo, organizadas conforme a tensão e corrente elétrica desejada.

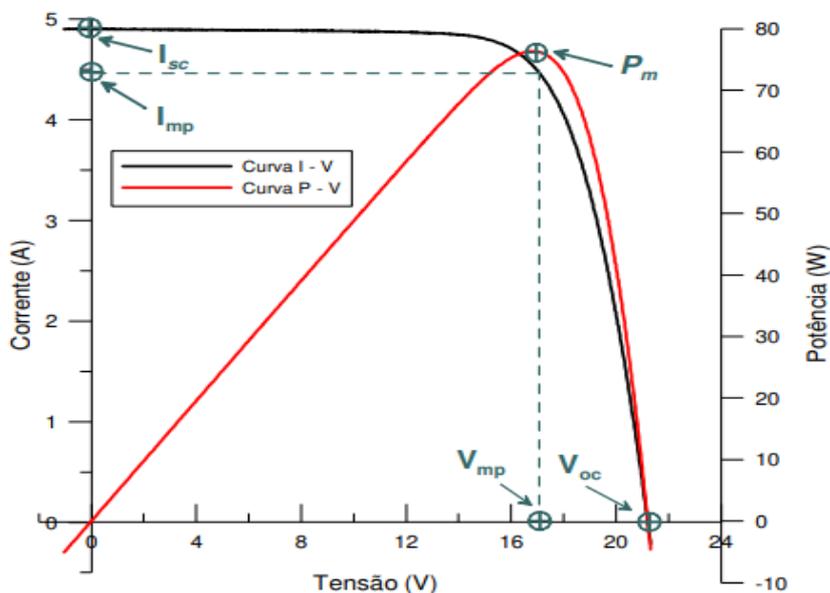
2.6.1 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

As características elétricas de um módulo fotovoltaico são determinadas com base nas variações de tensão e corrente elétrica. Estas variações ocorrem em função das condições climáticas, principalmente das alterações de temperatura e da radiação solar na região em que as mesmas foram instaladas (VIEIRA, 2014).

Os módulos FV são determinados por sua potência de pico (W_p), a qual é medida através de ensaios laboratoriais utilizando condições padrão de teste (STC, do inglês *Standard Test Conditions*), para se obter as curvas características, considerando uma radiação solar de 1000 W/m^2 e temperatura de 25° na célula (CRESESB, 2014).

Os ensaios laboratoriais são realizados de forma a determinar as características de um módulo FV, sendo traçadas as suas curvas características I-V. O módulo fica submetido às condições padrão de ensaio até transpor sua tensão de circuito aberto (V_{oc}). Durante o ensaio, são registrados pares de dados de tensão e corrente elétrica, permitindo o traçado de uma curva característica como denotado na Figura 7.

Figura 7 - Curva característica I-V e curva de potência P-V de um módulo FV.



Fonte: (GASPARIN, 2009).

De forma simultânea a Figura 7 ilustra duas curvas: a curva em preto é obtida entre o produto da corrente-tensão, resultando na potência estabelecida nas condições definidas de operação. A corrente (I_{sc}) caracteriza a corrente de curto circuito, medida sem carga conectada, conseqüentemente com tensão nula. Da mesma forma, a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é medida sem carga, acarretando em uma inexistência de corrente elétrica (GASPARIN, 2009).

Através da potência obtida na curva preto, é possível traçar a curva de potência em função da tensão, chamada de curva P-V, exibida na Figura 7 na cor vermelha. Esta curva, por meio de valores da corrente e tensão específicos, denotados como corrente de máxima potência (I_{mp}) e tensão de máxima potência (V_{mp}), determinam o ponto de valor máximo da potência. Portanto, nesse ponto, chamado de potência máxima (P_m) ou potência de pico (W_p), o módulo entregará sua maior geração de potência (VIEIRA, 2014).

Logo, os parâmetros que determinam as características elétricas de um módulo fotovoltaico, sob dadas condições de temperatura e radiação solar, são:

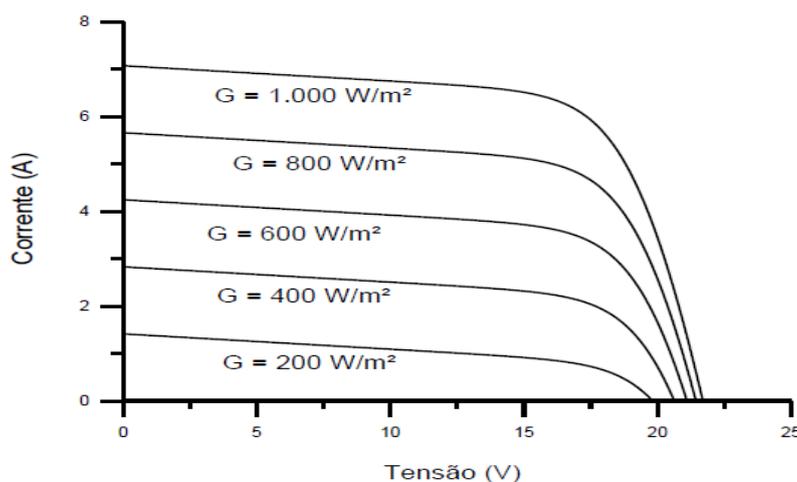
- Corrente de Curto Circuito (I_{sc});
- Tensão de Circuito Aberto (V_{oc});
- Corrente de Máxima Potência (I_{mp});

- Tensão de Máxima Potência (V_{mp});
- Potência Máxima (P_m).

2.6.1.1 Efeito da Intensidade de Radiação Solar Incidente sobre um Módulo Fotovoltaico

A corrente elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico se eleva linearmente com o aumento da radiação solar incidente sobre as células, de forma que, quanto maior a radiação solar incidente, maior será a corrente elétrica produzida, conforme ilustrado na Figura 8 (CRESESB, 2014).

Figura 8 - Variação da radiação solar sobre a curva I-V de um módulo FV.



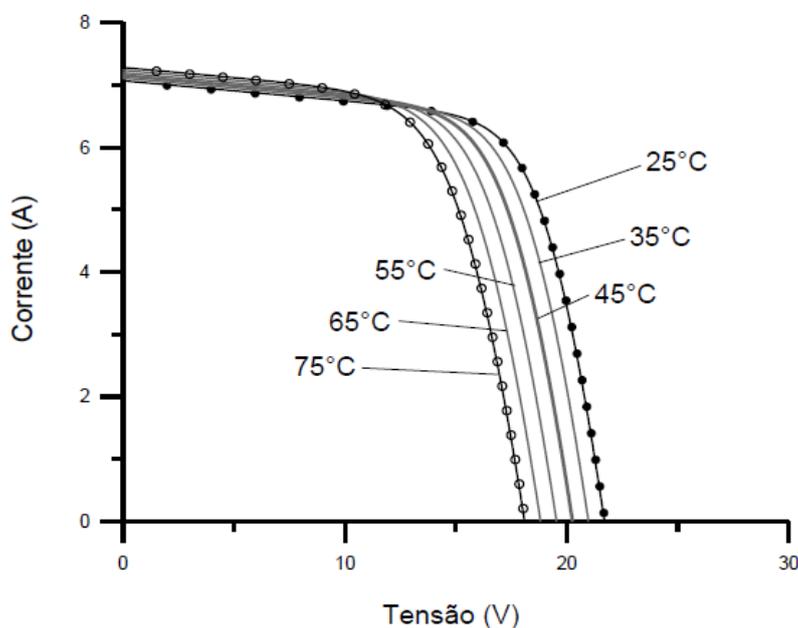
Fonte: (CRESESB, 2014, p.149).

2.6.1.2 Efeitos da variação de temperatura sobre a curva característica I-V

O aumento da temperatura nas células que compõem os módulos FV implicam em uma queda de tensão e um pequeno aumento na corrente elétrica, reduzindo assim a potência máxima (P_m) e, conseqüentemente, diminuindo a eficiência dos módulos FV (CRESESB, 2014).

Na Figura 9, é possível observar o efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva I-V, sob uma irradiância de 1000 W/m².

Figura 9 - Variação de temperatura nas células sobre a curva I-V.



Fonte: (CRESESB, 2014, p.150).

A eficiência de um módulo pode ser descoberta através da Equação 3, levando em conta as condições climáticas em que o módulo está submetido.

$$\eta = \frac{P_m}{A \times I_c} \quad (3)$$

Onde:

η - Eficiência do módulo fotovoltaico (%)

P_m - Potência do módulo fotovoltaico (Wp)

A - Área do módulo fotovoltaico (m²)

I_c - Radiação solar do local (W/m²)

2.7 Rastreadores Solares

Um rastreador solar é um dispositivo que tem a função de maximizar a irradiação solar sobre módulos fotovoltaicos, garantindo que os mesmos fiquem orientados constantemente de forma perpendicular aos raios solares, aumentando sua potência de geração de energia e, conseqüentemente, tornando os módulos mais eficazes (SILVA, 2012).

2.7.1 Classificação dos Rastreadores Solares

Os rastreadores solares podem ser classificados em dois grupos, levando em conta o mecanismo de construção, podendo ser denominados rastreadores passivos ou rastreadores ativos (SILVA, 2012).

Os rastreadores solares ativos têm como característica a utilização de um sistema de movimentação constituído por sensores de luminosidade ou algoritmos que detectam a posição do Sol e comandam motores elétricos para a movimentação da estrutura (PINTO, et. Al.,2010).

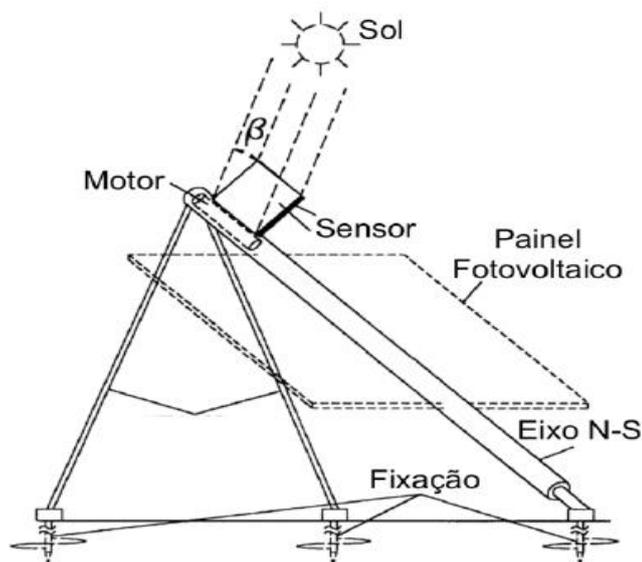
Há diversos tipos de rastreadores solares, os quais se diferem na quantidade de eixos, funções, preços e tecnologias. Sendo assim, pode-se classificar os rastreadores de acordo com as características e funções, da seguinte forma:

- Rastreador Solar de um eixo;
- Rastreador Solar de eixo horizontal;
- Rastreador Solar de dois eixos.

2.7.1.1 Rastreadores Solares de um Eixo

Também chamado de eixo polar, este modelo de rastreador possui um único eixo central Norte-Sul fixo em um ângulo, normalmente utilizado o mesmo da latitude do local, movendo-se apenas no sentido Leste-Oeste, garantindo a perpendicularidade do painel em relação aos raios de Sol nos equinócios da Primavera e de Outono. Na Figura 10, é mostrado um modelo de rastreador de um eixo (PINTO, et. Al.,2010).

Figura 10 - Rastreador Solar de um eixo.



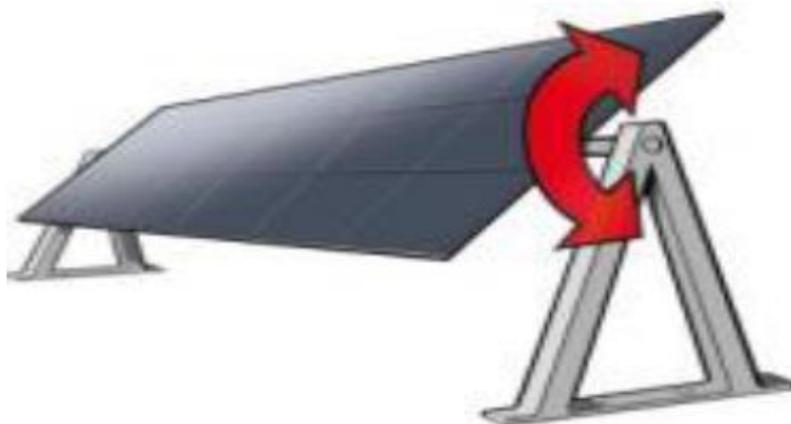
Fonte: (POULEK E LIBRA, 1998).

2.7.1.2 Rastreadores Solares de Eixo Horizontal

O rastreador solar de eixo horizontal, também conhecido como rastreador zênite, possui um eixo horizontal, de maneira que realiza um movimento no sentido Leste-Oeste, permitindo, deste modo, um seguimento sazonal do sol (PINTO, et. Al.,2010).

O presente modelo tem seu movimento de rotação similar ao do ângulo zênite. Comparado aos demais rastreadores, tem uma eficiência relativamente pequena. Porém, torna-se vantajosa a instalação deste tipo de sistema considerando o propósito de aumentar a eficiência total do sistema, em razão que este sistema pode suportar uma grande quantidade de módulos fotovoltaicos, utilizando toda a área exposta de radiação solar. Na Figura 11, é mostrado um modelo de rastreador de eixo horizontal (PINTO, et. Al.,2010).

Figura 11 - Rastreador Solar de Eixo Horizontal.



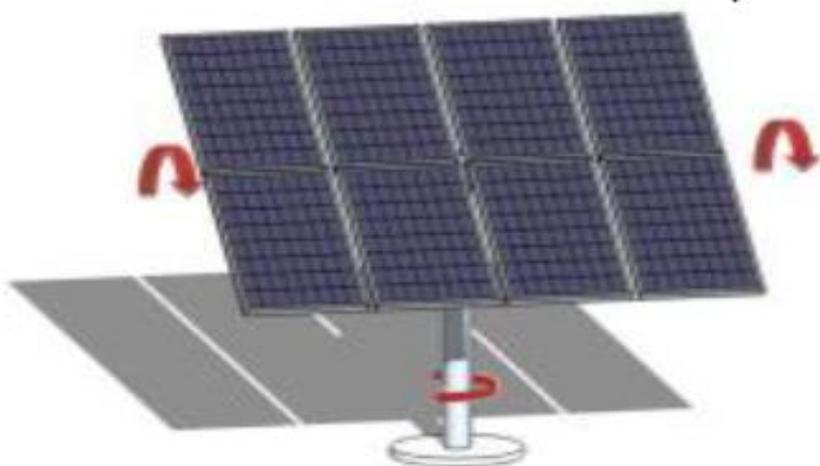
Fonte: (PINTO, et. Al.,2010).

O rastreador solar de eixo horizontal diferentemente dos outros tipos de rastreadores, não tem a necessidade de possuir equipamentos automatizados de rastreio, atuando através de uma sequência previamente determinada de posições fixas (PINTO, et. Al.,2010).

2.7.1.3 Rastreadores Solares de dois Eixos

O rastreador solar de dois eixos possibilita com que o sistema se movimente, simultaneamente, tanto no eixo vertical quanto no eixo horizontal, de forma com que realiza movimentos em diferentes direções, buscando o deslocamento azimutal e o ângulo de inclinação ou zênite ideais do local, aumentando o rendimento de captação da radiação solar. Na Figura 12, é mostrado um modelo de rastreador de eixo horizontal (PINTO, et. Al.,2010).

Figura 12 - Rastreador de Eixo Duplo.



Fonte: (PINTO, et. Al.,2010).

2.8 Considerações Finais

Este Capítulo apresentou a fundamentação teórica sobre algumas informações e aspectos básicos que são levados em consideração para o entendimento de todo sistema de geração de energia solar, voltados à geração de energia através do uso de módulos fotovoltaicos.

Foi mostrado que a radiação solar e a temperatura influenciam diretamente na potência máxima de geração de energia elétrica sobre os módulos e que já estão sendo projetados diferentes tipos de rastreadores solares para diminuir as perdas e elevar sua eficiência. Porém, é necessário um estudo de caso para analisar qual sistema utilizar, verificando a viabilidade de instalação na região de interesse.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Gerais

Neste Capítulo, são abordados os materiais utilizados na montagem e seus respectivos valores de mercado. São citados os métodos utilizados, descrevendo todos os componentes de atuação, características mecânicas e construtivas para a realização da montagem prática dos sistemas, sendo um com rastreador solar de dois eixos e outro, um sistema gerador solar fixo, os quais são posteriormente analisados e comparados para descobrir seus rendimentos.

3.2 Descrição do Sistema Experimental

A pesquisa tem como objetivo implementar e analisar dois sistemas fotovoltaicos, um deles contendo na estrutura dois módulos fixos, posicionados de acordo com as coordenadas geográficas e o outro, com mecanismo de rastreamento do sol, possuindo outros dois módulos da mesma marca e modelo, com movimentação em dois eixos. Ambos os sistemas instalados no mesmo local, com wattímetros digitais para medição de tensão, corrente elétrica e potência gerada.

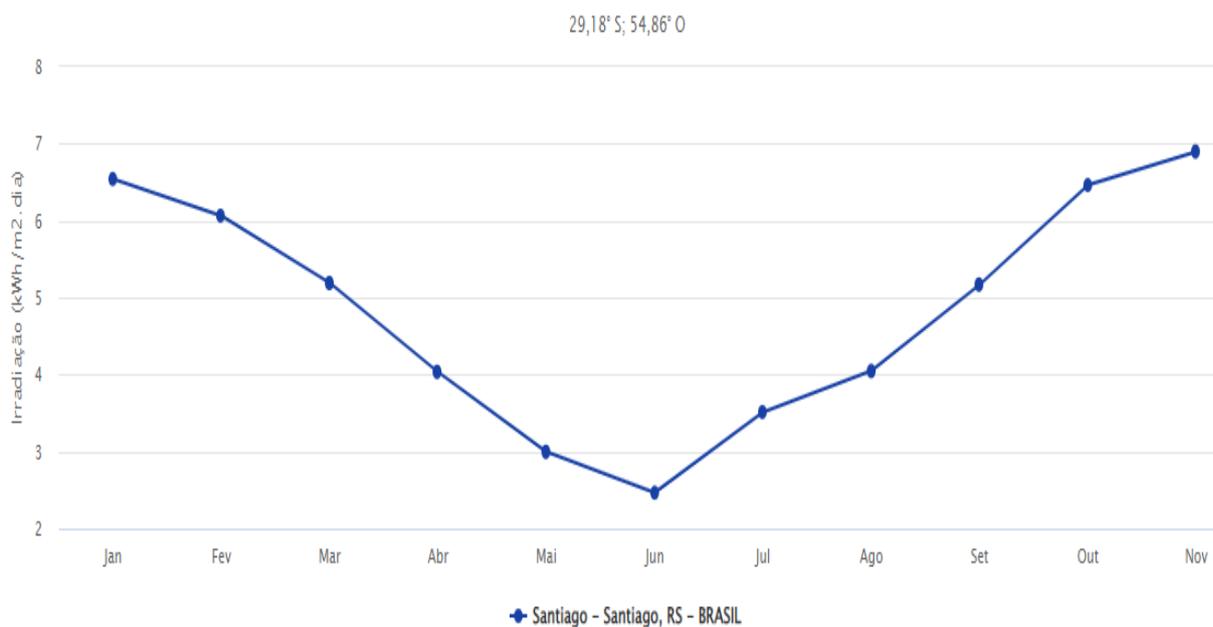
No sistema com a implementação de rastreamento solar, o controlador tem a função de orientar os módulos perpendiculares a radiação solar, com o emprego de um dispositivo, conhecido como Resistor Dependente da Luz (LDR), com características de diminuir a resistência elétrica quando incidido a uma energia luminosa. Através de sinais transferidos do LDR para o controlador, são ativados motores de passo, mantendo o sistema em constante movimento conforme o movimento do Sol.

3.3 Caracterização do Local

O experimento foi desenvolvido na laje de um sobrado localizado na cidade de Santiago/RS. O município está situado na região Oeste do estado, com localização geográfica definida pelas coordenadas 29°18' Latitude Sul e 54°86' Longitude Oeste, com altitude de 409 metros acima do nível do mar.

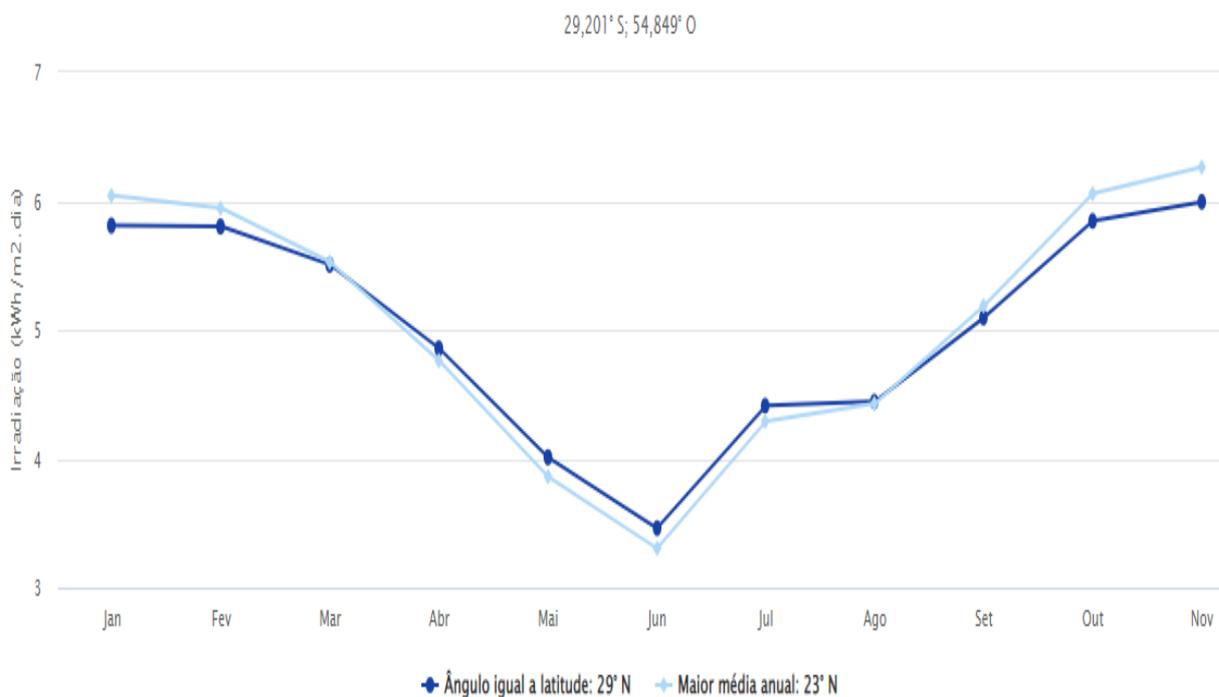
De acordo com a CRESESB, que utiliza o programa *SunData* como ferramenta para calcular a irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional, o local onde o experimento foi desenvolvido tem uma irradiação média de 4,68 kWh/m².dia no plano horizontal, conforme ilustrado na Figura 13. No plano inclinado a irradiação média é de 4,93 kWh/m².dia para um ângulo de inclinação igual a latitude do local 29°18' com orientação Norte, e uma irradiação média de 4,95 kWh/m².dia para um ângulo de inclinação 23° com orientação Norte, conforme ilustrado na Figura 14. Seus parâmetros podem ser vistos na Tabela 1, com as médias mensais e a média anual dos respectivos ângulos citados acima.

Figura 13 - Irradiação Solar no Plano Horizontal em Santiago/RS.



Fonte: (SUNDATA, 2017).

Figura 14 - Irradiação Solar no Plano Inclinado em Santiago/RS.



Fonte: (SUNDATA, 2017).

Tabela 1 - Irradiação Solar Média Mensal no Plano Horizontal e nos Planos Inclinados em 29° e 23° em Santiago/RS.

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0° N	6,54	6,06	5,19	4,04	3,00	2,47	2,80	3,51	4,05	5,17	6,46	6,90	4,68
Igual a Latitude	29° N	5,81	5,80	5,51	4,86	4,01	3,46	3,88	4,41	4,44	5,09	5,85	5,99	4,93
Maior Média anual	23° N	6,04	5,94	5,53	4,76	3,86	3,31	3,71	4,29	4,43	5,19	6,06	6,26	4,95

Fonte: Adaptação (SUNDATA, 2017).

Analisando os gráficos das Figuras 13 e 14 e a Tabela 1, é possível notar que a irradiação solar média mensal no presente local, tem uma considerável variação conforme o ângulo de medição. Nota-se que, nos meses entre outubro e fevereiro, a irradiação é maior no plano horizontal (0° Norte). Já nos meses de março até setembro, a irradiação é maior nos ângulos de (29° Norte) e (23° Norte). É possível perceber que o ângulo de (23° Norte), nos meses de setembro até março, tem uma irradiação maior. As variações de irradiação solar durante os meses ocorrem devido

ao ângulo de inclinação da Terra em relação ao Sol, relatados na Seção 2.3.1 do presente Trabalho.

3.4 Especificações Técnicas dos Materiais Utilizados

3.4.1 Módulos Fotovoltaicos

Para a realização do experimento, foram utilizados quatro módulos fotovoltaicos, sendo todos do mesmo modelo, com especificações técnicas descritas na Tabela 2. Para o primeiro sistema, foram utilizados dois módulos em estrutura fixa, considerando a inclinação resultante da maior irradiação solar média mensal, com ângulo de inclinação de 23°, orientados para o Norte, levando em conta os dados na Tabela 1, retirados do programa computacional *SunData*.

Tabela 2 - Características técnicas do módulo utilizado.

Modelo	DHM-72X10-545W
Potência Máxima (P_m)	545 W
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	50,0 V
Tensão de Máxima Potência (V_{mp})	42,2 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	13,72 A
Corrente de Máxima Potência (I_{mp})	12,91 A
Dimensões do módulo	2256x1133x35 mm
Máxima Tensão do Sistema	1500 V DC
Eficiência	21,30 %

Fonte: Autor.

Os módulos fotovoltaicos presentes no experimento são constituídos de células de silício monocristalino, conforme ilustrados na Figura 15.

Figura 15 - Módulo Fotovoltaico Utilizado.

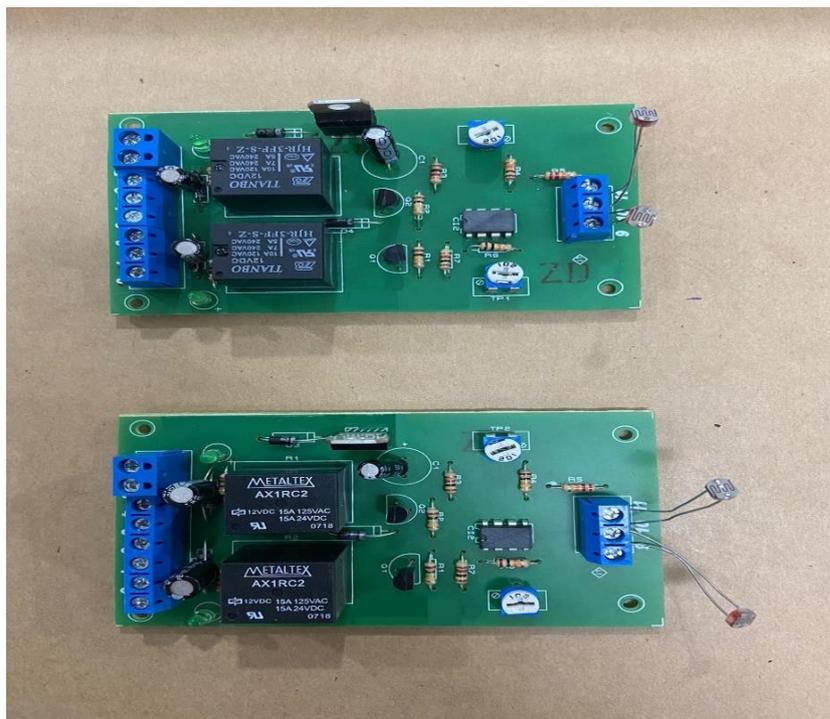


Fonte: Autor.

3.4.2 Hardware

O sistema com rastreador solar de dois eixos utiliza um dispositivo eletrônico que tem por finalidade realizar as funções de acionamento e controle. O dispositivo eletrônico possibilita o acionamento e a interrupção dos motores de passo através de relés. O emprego de LDR's tem a finalidade de controle do sistema, rastreando o posicionamento solar durante o dia. Por ter a função de atuação em apenas um eixo, foram utilizados dois dispositivos eletrônicos iguais. A Figura 16 mostra os dispositivos utilizados.

Figura 16 - Dispositivos Eletrônicos Utilizados no Experimento.

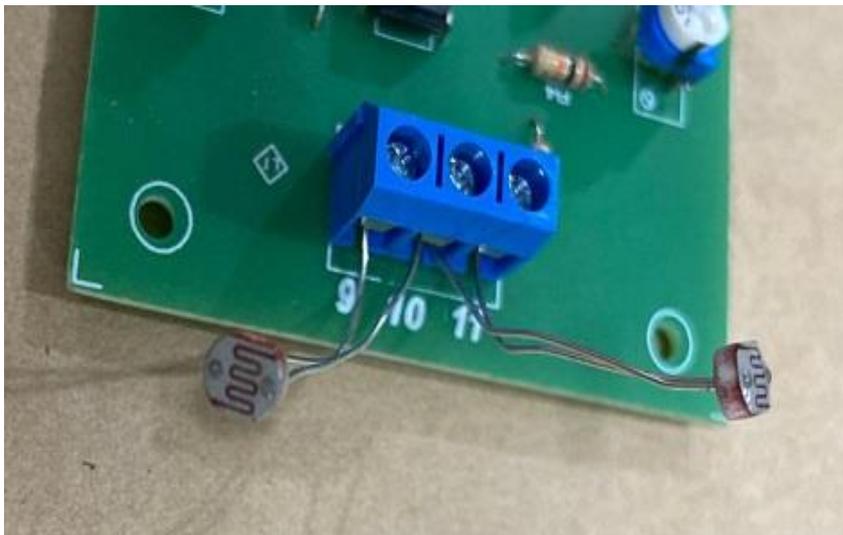


Fonte: Autor.

3.4.2.1 Sensor de Luminosidade

O sistema de sensoriamento da posição solar é formado por um artefato constituído por dois fotoresistores LDR (*Light Dependent Resistors*). Os sensores detectam a variação de luminosidade devido à movimentação natural do sol. Dessa maneira, o dispositivo eletrônico identifica essa diferença e aciona comandos de atuação para corrigir a posição do módulo fotovoltaico de modo que cada sensor atua de forma independente, permitindo o sistema mover-se para ambos os lados, buscando a maior incidência de luz. Para o correto funcionamento do experimento, foram necessários quatro LDRs. A Figura 17 representa a disposição dos sensores na estrutura.

Figura 17 - Disposição dos LDRs no Dispositivo Eletrônico.



Fonte: Autor.

3.4.2.2 Sensor de Fim de Curso

Sensores fim de curso conectados às entradas do dispositivo eletrônico controlador limitam a excursão do sistema. Quando o sistema chega a determinados pontos, como o ponto de inclinação máxima ou mínima, que acontece normalmente no fim do dia, quando o Sol se põe, o dispositivo eletrônico determina através de relés que o motor desligue, de modo que a estrutura deixe de se mover. Foram utilizados o total de quatro sensores fim de curso, um para cada extremidade de eixo. A Figura 18 mostra o tipo de fim de curso utilizado.

Figura 18 - Sensores Fim de Curso Utilizados.



Fonte: Autor.

3.4.3 Atuadores

A movimentação do sistema é feita através de motores 12 V de corrente contínua, com potência de 18 W, atuando de forma linear, alimentados através da ponte H, utilizando um módulo H existente no dispositivo eletrônico do sistema. Foram necessários dois motores de passo, uma para cada eixo. A Figura 18 mostra o motor utilizado para o controle de rotação do sistema.

Figura 19 - Motor de Passo 12 V.



Fonte: Autor.

A Tabela 3 ilustra os consumos aproximado dos motores atuadores utilizados no projeto para o sistema com rastreamento de eixo duplo.

Tabela 3 - Consumo médio dos motores atuadores do sistema móvel.

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Horas/dia	Consumo (kWh)
Motor 1	12	1,76	18	2,5	1,35
Motor 2	12	1,62	18	3	1,62

Fonte: Autor.

3.4.4 Fonte de Alimentação

Para alimentar o dispositivo eletrônico e o motor de passo, que necessitam de uma tensão 12 V de corrente contínua, foi utilizada uma fonte de alimentação, com as especificações técnicas descritas na Tabela 3.

Tabela 4 - Características técnicas da Fonte de Alimentação.

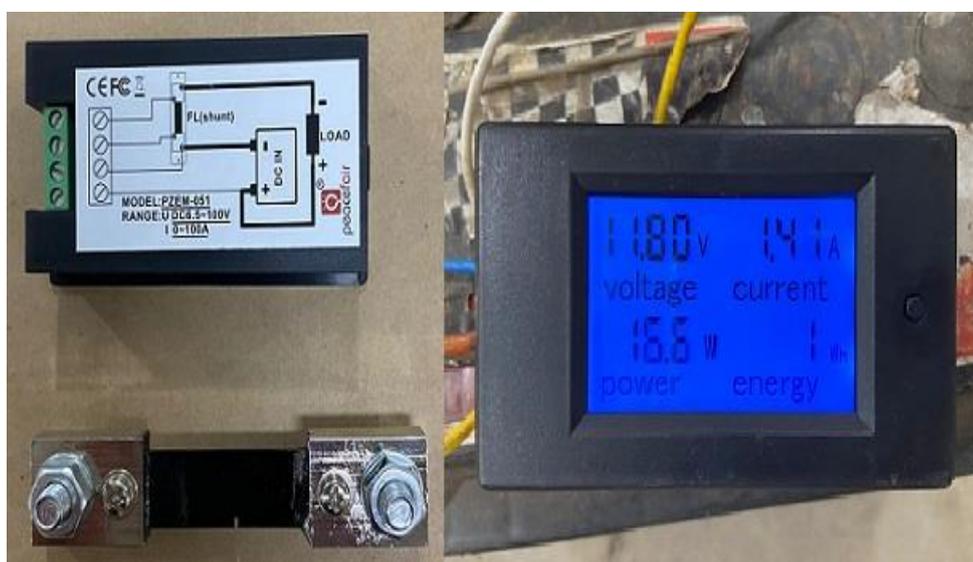
	Tensão (V)	Corrente (A)
Entrada	110/220	1,1
Saída	12	20

Fonte: Autor.

3.4.5 Medidor de Energia

Para coletar os parâmetros de medidas foram utilizados dois wattímetros digitais, realizando a medição da tensão, corrente elétrica, potência elétrica e consumo gerado em kWh, entre ambos sistemas, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Wattímetro Digital DC.



Fonte: Autor.

3.5 Caracterização dos Métodos Aplicados

Inicialmente, definiu-se o posicionamento dos módulos fixos na estrutura, devidamente instalados com inclinação e orientação previstos anteriormente. A Figura 21 ilustra o posicionamento do sistema.

Figura 21 - Inclinação e Orientação Geográfica dos Módulos Fixos.



Fonte: Autor.

3.5.1 Desenvolvimento do Sistema com Rastreador Solar

Primeiramente, foi elaborada a parte estrutural e mecânica do sistema com mobilidade em dois eixos, a fim de acompanhar o movimento do Sol ao longo do dia.

Conforme a Figura 22, foram empregadas engrenagens para aumentar o torque do motor de passo e reduzir a velocidade de movimentação, para que torne o sistema de rastreamento mais preciso.

Figura 22 - Sistema de mobilidade do Eixo Vertical.



Fonte: Autor.

Logo após, foi empregado o atuador, que exerce a mesma função de um pivô no sistema, através do segundo motor de passo, acoplado a um eixo roscado fixado a um ponto próximo à extremidade superior da estrutura, movendo-se acordo com o ângulo de declinação e assim mantendo os módulos no ângulo correto, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 - Atuador Vertical.

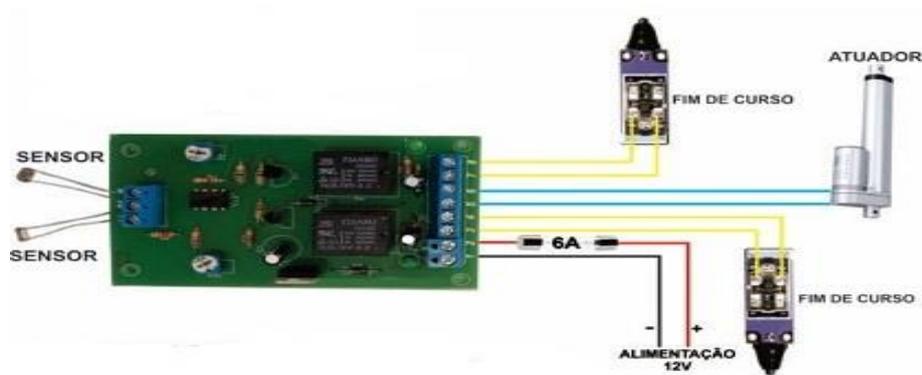


Fonte: Autor.

3.5.1.1 Sistema Elétrico de Montagem

Os dispositivos eletrônicos de rastreamento solar foram instalados independentes um do outro, com funções análogas, porém, realizando movimentos distintos. A Figura 24 ilustra como é feito o sistema de ligação entre o dispositivo eletrônico e os componentes do sistema que realizam o controle e funcionamento do mesmo.

Figura 24 - Disposição da Conexão dos Componentes do Sistema.



Fonte: Autor.

3.6 Custos dos Equipamentos

Na Tabela 5 são apresentados os custos dos equipamentos e materiais utilizados no sistema fotovoltaico estático, e na Tabela 6 são apresentados os custos dos equipamentos e materiais utilizados no sistema fotovoltaico com rastreamento solar de dois eixos.

Tabela 5 - Custos dos equipamentos e materiais utilizados no sistema estático.

Quantidade	Equipamento	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
2	Módulo Fotovoltaico Monocristalino 545W	1.519,00	3.038,00
1	Inversor 2kW MONO-220V (MIC 2000TL-X)	2.476,60	2.476,60
1	String Box CC	336,32	336,32
1	Cabos CC	136,11	136,11
1	Estrutura fixa para laje	540,16	540,16
Custo Total do Sistema Fixo com 1,09 kWp		R\$ 6.527,19	

Fonte: Autor.

3.7 Considerações Finais

Neste Capítulo, foram apresentadas os materiais e métodos utilizados para a construção dos sistemas em questão juntamente com seus respectivos custos de equipamentos. A elaboração de um experimento empregando um sistema com rastreador solar abrange uma grande quantidade de componentes para ser elaborado, envolvendo componentes mecânicos e elétricos, tornando o projeto parcialmente complexo. A execução de orientação dos sistemas foi baseada nas análises abordadas na Seção 3.3 do presente trabalho.

Tabela 6 - Custos dos equipamentos e materiais utilizados no sistema móvel.

Quantidade	Equipamento	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
2	Módulos Fotovoltaicos Monocristalino 545W	1.519,00	3.038,00
1	Inversor 2kW MONO-220V (MIC 2000TL-X)	2.476,60	2.476,60
1	String Box CC	336,32	336,32
1	Cabos CC	136,11	136,11
1	Estrutura de fixação móvel do sistema	1759,00	1759,00
2	Motor de passo 12v	125,00	250,00
2	Wattímetro	105,00	210,00
2	Placa eletrônica	92,50	185,00
1	Fonte de alimentação 12v 50A	98,99	98,99
4	Chave fim de curso	44,00	176,00
1	Temporizador Digital	138,00	138,00
Custo Total do Sistema Móvel com 1,09 kWp		R\$ 8.804,02	

Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de Geração

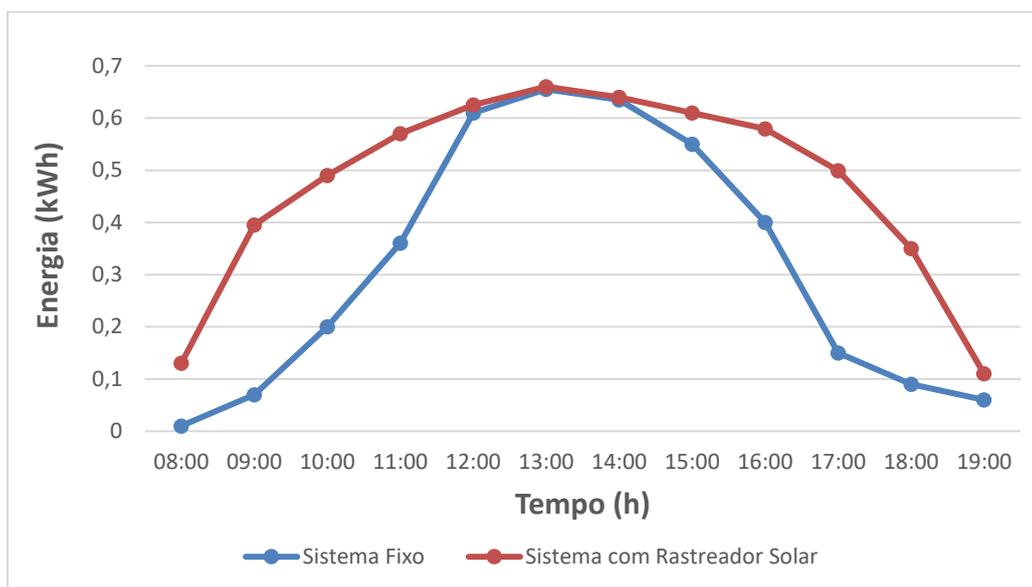
Os resultados foram obtidos através da coleta de energia consumida por ambos os sistemas instalados, relatando os rendimentos alcançados de geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos.

Para analisar o desempenho de ambos os sistemas, foi realizada a coleta de dados entre os dias 15 e 16 de fevereiro de 2022, realizando as medições em intervalos de 1h, iniciando o levantamento de dados às 8h, permanecendo até às 19:00h do mesmo dia.

Os dados da primeira coleta foram em dia típico de verão, 15 de fevereiro de 2022, para os dois sistemas de geração. A Figura 25 mostra o perfil de geração de potência elétrica instantâneas dos módulos fixo (Azul) e com rastreamento solar (Vermelho). O gráfico permite visualizar as variações entre os sistemas em determinadas horas do dia. Nota-se que entre o intervalo das 12h00 às 14h00 os sistemas têm geração praticamente iguais, isso acontece pelo fato do sistema fixo estar orientado geograficamente na posição em que a irradiação solar é mais intensa durante o decorrer do dia. Já entre o horário das 8h00 às 11h e 15h às 19h, o sistema com rastreamento solar teve um ganho de geração consideravelmente maior.

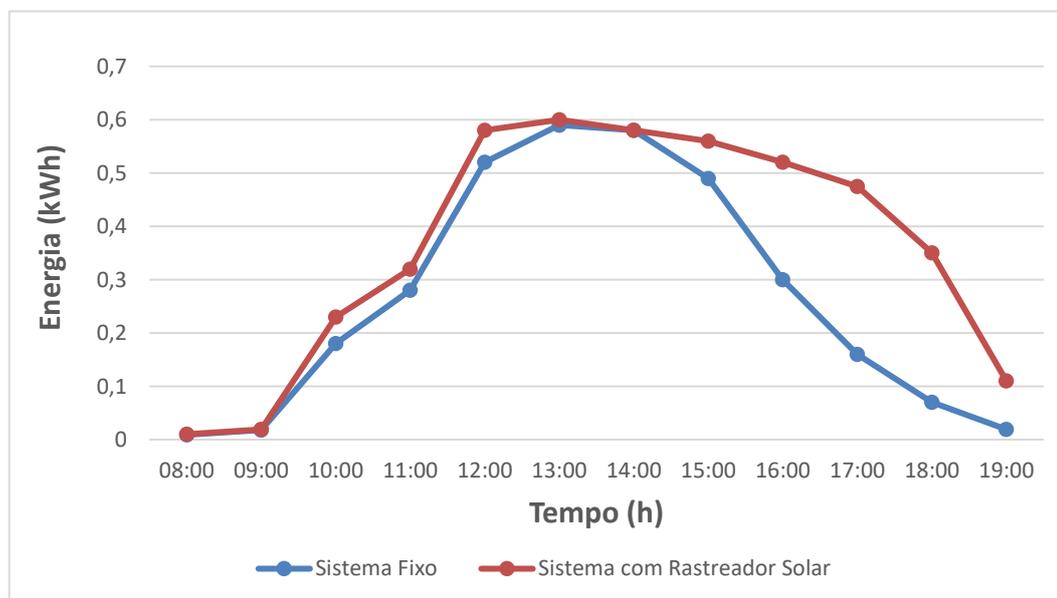
O segundo dia de coleta que ocorreu em 16 de fevereiro de 2022, parcialmente nublado pela parte da manhã, a Figura 26 mostra o perfil de geração de potência elétrica instantâneas dos módulos fixo (Azul) e com rastreamento solar (Vermelho). O gráfico permite visualizar que durante o período da manhã os sistemas tiveram uma geração semelhante, isso devido à nebulosidade durante o período. Já no intervalo entre 14h00 às 19h, com a presença de Sol sem nuvens, o sistema com rastreamento solar teve um ganho de geração consideravelmente maior.

Figura 25 - Comparativo de Geração de Energia do Sistema Fixo com o Móvel no dia 15/02/2022.



Fonte: Autor.

Figura 26 - Comparativo de Geração de Energia do Sistema Fixo com o Móvel no dia 16/02/2022.



Fonte: Autor.

4.2 Ganhos Relativos Percentuais de Geração

Conforme ilustrado na Tabela 7, o rendimento do sistema com rastreador solar, no dia 15 de fevereiro de 2022, foi 22,67% maior do que o sistema fixo. Já no dia 16 de fevereiro de 2022, o rendimento do sistema com rastreador foi 14,53% maior que o sistema fixo. Essa notável diferença de rendimento foi ocasionada devido a nebulosidade no segundo dia, tornando o rendimento do sistema de rastreador solar relativamente baixo.

Tabela 7 - Desempenhos dos Sistemas Fotovoltaicos.

Dia	Energia Sist. Móvel (kWh/dia)	Energia Sist. Fixo (kWh/dia)	Ganho (%)	Condições Climáticas
15/02	5,980	4,875	22,67	Ensolarado
16/02	4,334	3,784	14,53	Nublado pela parte da manhã
Média	5,157	4,329	19,12	

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados experimentais obtidos entre ambos os sistemas, conclui-se que a geração fotovoltaica utilizando rastreamento solar no município de Santiago/RS demonstra superioridade de geração comparada ao sistema fixo.

O aumento de geração dos módulos com rastreamento solar se deve à distância em relação à linha do Equador, pois há grandes variações na posição do Sol ao longo do dia e do ano.

Em dias nublados, devido à radiação solar difusa desorientar o sistema de rastreio, seu rendimento é praticamente igual ao de um sistema fixo, tornando o sistema ineficiente.

A instalação de um sistema utilizando rastreamento solar de dois eixos eleva a complexidade construtiva, tornando os custos de instalação e manutenção muito superiores se comparados com o sistema fixo, porém a longo prazo o investimento superior poderá ser suprido com uma maior produção de energia anual.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Após a realização de uma pesquisa e o levantamento bibliográfico sobre determinado tema, novas perspectivas surgem acerca do mesmo assunto. Ficam as sugestões para pesquisas futuras:

- Comparar o sistema em estudo com um sistema com refrigeração, permitindo avaliar a influência da temperatura na geração de energia;
- Melhorar a automação dos módulos fotovoltaicos, de modo a não haver desorientação do sistema de rastreamento;
- Fazer uma análise e comparação entre os dois sistemas ao longo do ano todo;
- Introduzir no sistema uma automação com anemômetro que possa em rajadas de ventos superiores ao suportável pela estrutura se posicionar de forma que não ocasione perigo para a danificação do sistema com rastreamento;
- Elaborar uma análise de estimativa de retorno financeiro, verificando se é viável a instalação de um sistema com rastreamento solar.

REFERÊNCIAS

ABDELLATIF, O. Experimental investigation of different cooling methods for photovoltaic module. 11th **International Energy Conversion Engineering Conference**, p. 1098–1102. 2013.

ALCÂNTARA, É. C. **Ferramenta para estimar o desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes estruturas de inclinação e tecnologias – Uma análise comparativa do ganho proveniente da utilização de seguidor de Sol e concentrador solar**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica **Atlas de Energia Elétrica**, 2ª Edição. Brasília, 2005.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica **Atlas de Energia Elétrica**, 3ª Edição. Brasília, 2009.

ANEEL, **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª edição, Brasília, 2008.

CASTAÑEDA, César Eduardo Figueroa. **Desenvolvimento de um Rastreador Solar Passivo por Transferência de Massa**. Curitiba, 2011.

CRESESEB - 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 30 de janeiro de 2022.

CRESESEB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, Rio de Janeiro, 2004.

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

CRESESEB. **Energia Solar – princípios e Aplicação**. Centro de Referência para energia solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2014.

FREITAS, F., CHRISTIAN. **Seguidor solar para sistemas fotovoltaicos**. São Paulo, 2008.

GASPARIN, F. P. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. 2009. 58f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

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

PINTO, Aimé. MACAGNAN, Mario. ZILLES, Roberto. LEHMANN, Jeremias. **Descrição de Seguidores Solares e sua Aplicação em Centrais Fotovoltaicas Conectadas à Rede**. III Congresso Brasileiro de Energia Solar – CEBENS. Pará, 2010.

PORTAL ENERGIA, 2016. **Entenda um sistema seguidor solar fotovoltaico.** Disponível no site: <<https://energiainteligenteufjf.com.br/energia-2/entenda-um-sistema-seguidor-solar-fotovoltaico/>>. Acesso em jan. 2022.

RAMOS, F., LUCAS, **Metodologia detalhada para rastreadores solares automatizados de dois eixos em sistemas fotovoltaicos autônomos.** Santa Maria - RS, 2016.

SILVA, Marta Cristina da Costa. **Estudo Comparativo de um Painel Solar Fotovoltaico Fixo vs Móvel.** Portugal, 2012. Dissertação de mestrado. Universidade no Minho. Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores.

TREVELIN, Felipe. **Estudo Comparativo entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos.** São Paulo, 2014.

VIEIRA, R. G. et al. **Análise comparativa do desempenho entre um painel solar estático e com rastreamento no município de Mossoró-RN.** Dissertação (Pos Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró – RN, 2014.