

# ANÁLISE COMPARATIVA DE RENDIMENTO ENTRE PAINEL FOTOVOLTAICO DE ÂNGULO FIXO E VARIÁVEL

**Autor: Mateus Vinicius Souza**  
**Orientador: Geovane Duarte Pinheiro**

## RESUMO

A busca pela diversificação da matriz energética brasileira traz destaque à energia solar fotovoltaica pelo seu potencial de produção no Brasil. A radiação do sol que incide na Terra é diferente em cada local e, para cada instante do dia, essas variações geram uma menor eficiência de conversão de energia solar nos painéis fotovoltaicos de eixos fixos; assim, sendo uma solução o emprego de rastreadores solar, possuindo um eixo de deslocamento ou dois. O objetivo deste trabalho, portanto, é realizar a comparação entre dois estudos, verificando a geração de energia elétrica para sistemas fotovoltaicos com eixo fixo, eixo único e com eixo duplo. Desse modo, foram levantados dados de geração de energia elétrica e incidência solar média para cada modelo de captação solar. Nos dois estudos, observou-se que a introdução do rastreador aumentou a geração de energia elétrica, sendo o maior aumento observado para os sistemas de eixo duplo, concluindo que a utilização do rastreador aumenta a eficiência de geração de energia em comparação ao de eixo fixo e ao de eixo único.

**Palavras-Chave:** Sistemas de rastreamento. Energia solar. Rendimento. Eficiência.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se em um período de desenvolvimento econômico incerto, porém a demanda de energia elétrica tende a crescer cada vez mais. O país possui um vasto potencial na produção de combustíveis fósseis e faz parte do grupo de países em que a produção de eletricidade é proveniente, em sua maior parte, de usinas hidrelétricas (MORAIS, 2015).

Nesse contexto, há a busca por soluções que visem diminuir o nível de poluição ligada ao uso de energia oriunda de combustíveis fósseis, bem como evitar a construção de hidrelétricas de grande porte devido ao grande impacto ambiental que seus reservatórios acarretam, tendo em vista seu aumento com o passar do tempo (URBANETZ JUNIOR, 2010).

Outro fator que aparece como uma desvantagem é que, pela extensão territorial do Brasil, os grandes centros de consumo de energia, normalmente, ficam distantes das hidrelétricas, sendo necessário construir linhas de transmissão muito extensas (DIAS *et al.*, 2017). Sendo assim, fontes alternativas de energia, como a energia solar, apresenta grande capacidade para contribuir nesse cenário.

Outrossim, o Brasil apresenta grande potencial na produção de energia solar fotovoltaica por conta da sua localização geográfica (SOUZA *et al.*, 2020). No entanto, o sol incide de maneira diferente em cada local do planeta; e, por conta disso, quanto mais próximo uma localidade está da linha do Equador, mais favorável será a captação do nível de insolação por não ter uma grande variação da duração de horas de brilho solar. Essa incidência também pode variar conforme a latitude local, dia do ano e horário do dia (GREENPRO, 2004).

Considerando o modelo de movimentação solar, a posição do sol varia 360° no eixo azimutal (leste-oeste) diariamente, mas um observador, num ponto fixo, observa apenas metade desta trajetória que ocorre num período de 12 horas, sem levar em consideração o efeito do horizonte. No eixo de altitude (norte-sul), o ângulo da altura solar apresenta uma variação de

até 46° entre sua posição mais baixa que ocorre no inverno a sua localização mais alta, que ocorre no verão (HEINZ, 2016).

Tais variações angulares implicam em uma menor eficiência na conversão de energia solar em eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos de eixo fixo (TREVELIN, 2014). O desalinhamento entre a incidência solar e a superfície do gerador provoca uma menor produção, surgindo a necessidade de amenizar tais perdas.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre um gerador de energia elétrica de eixo fixo com um sistema gerador com rastreamento solar de eixo único e eixo duplo, buscando a alternativa mais eficiente de acordo com sua aplicação.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL

O Brasil é um país privilegiado quando avaliado pela perspectiva energética, por ter hidrografia, relevo e clima tropical que possibilitam o aproveitamento de fontes de energia renováveis variadas, como a biomassa, hidráulica, eólica e solar (PINTO *et al.*, 2010). O Brasil, no cenário mundial, está entre os países em crescimento econômico e tecnológico, o que necessita de uma maior disponibilidade de energia elétrica. Desta forma, a programação da utilização de seus recursos naturais é extremamente essencial na procura de um desenvolvimento sustentável (VELLOSO, 2017).

As legislações ambientais e os obstáculos nos processos de concessão aumentam as dificuldades da construção de grandes usinas hidrelétricas. Apesar que, o Brasil, em comparação a outros países latino-americanos tenha destaque em geração de energia por fontes renováveis não hídricas, ainda há obstáculos que prejudicam uma utilização compatível com seu potencial. Porém, a tendência do uso das fontes solar e eólica na matriz energética, retrata uma capacidade de energia de reserva que proporciona cobrir os riscos hidrológicos (AQUILA *et al.*, 2017).

Como as fontes renováveis apresentam variabilidade e intermitência em sua oferta, existe uma falta de confiança para a sua utilização exclusiva. Outrossim, mesmo com uma certa incerteza nas suas variáveis, algumas podem ser previstas através de modelos matemáticos, reduzindo seus efeitos. A utilização de mais de uma fonte de energia renovável, junto a uma matriz de sistemas de armazenamento ou de backup, podem amenizar essas desvantagens (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018).

Decorrente dos impactos da utilização dos combustíveis fósseis nas mudanças climáticas e pela modificação do estilo de vida da sociedade moderna, o emprego de fontes alternativas ganhou mais espaço nas políticas e planejamento setorial (COLLAÇO; BERMAN, 2017).

A lei 10.438/2008, que criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), teve grande impacto no setor elétrico, por buscar aumentar a participação da energia proveniente de fonte eólica, pequenas centrais hidrelétricas e de biomassa no Sistema Interligado Nacional de Energia Elétrica (SILVEIRA, 2018).

A RES 482/2012 (ANEEL, 2012) é uma referência para o uso da energia solar na matriz energética, onde estabelece as condições gerais para o acesso em microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, estabelecida por fontes renováveis de energia e ligados ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Em 2015, foi lançado o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (PROGD), com o intuito de ampliar e aprofundar as atividades de incentivo à

geração de energia pelos próprios consumidores, por meio das fontes de energia renováveis, com maior ênfase para a solar fotovoltaica (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018).

O Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, representando 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil. Mesmo com uma participação de apenas 2,47%, a fonte solar fotovoltaica é a que apresenta maior crescimento, para a geração elétrica e também para o fator potência instalada. Em 2020, a micro e minigeração distribuída alcançou 9.810 GWh com uma potência instalada de 8.965 MW, sendo a fonte solar fotovoltaica responsável por 9.019 GWh e 8.771 MW de geração e potência instalada, respectivamente (BEN, 2022).

## 2.2 ENERGIA SOLAR

Segundo Pereira *et al.* (2006), o Brasil, pela sua localização geográfica, tem a vantagem de possuir grande capacidade energética solar durante todo o ano. A utilização em longo prazo da energia solar traz inúmeros benefícios ao país, sendo, um deles, a menor dependência do mercado de petróleo, a oportunidade de desenvolvimento de cidades em regiões remotas onde é inviável a instalação da rede convencional de eletricidade e, também, auxilia ao cumprimento do Protocolo de Kyoto que tem o objetivo de reduzir as emissões de gases poluentes na atmosfera que agravam o efeito estufa.

O sol é responsável pelo desenvolvimento da vida no planeta. Ele pode ser visto de acordo com os atuais níveis de consumo energético, como uma fonte de energia inesgotável. A energia gerada por essa estrela é uma das fontes energéticas mais promissoras, lembrando que o Sol é responsável pela origem da maioria das fontes de energia, sendo elas hidroelétrica, solar, eólica, biomassa e combustíveis fósseis, que podem ser consideradas como aproveitamento indireto ou direto da energia solar (BRAGA, 2008).

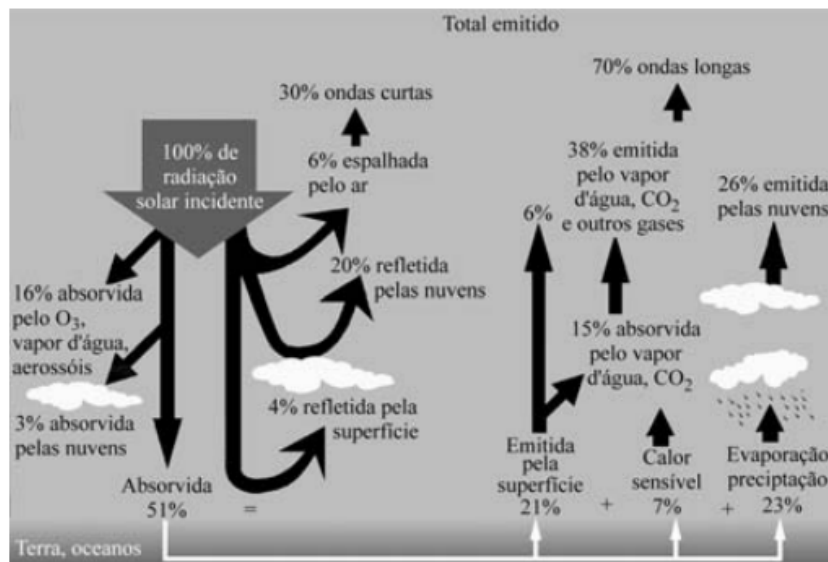
A radiação solar, como fonte primária de energia, apresenta-se como recurso vital para a manutenção da vida no planeta. Além disso, é responsável por gerenciar processos de evaporação, ciclo diurno e sazonal de temperatura e fotossíntese, além de impactar em diversas atividades humanas, dentre elas, no aproveitamento de energia solar, na agropecuária, na engenharia, na arquitetura, na hidrologia e diversos outros setores do conhecimento (LIMA, 2015). Desempenha um papel decisivo em diferentes processos encontrados nas energias renováveis, hidrologia, bem como na arquitetura e engenharia. É a fonte mais importante de energia renovável, atuando como um modulador crucial do sistema climático (ALMOROX *et al.*, 2020).

O sol fornece anualmente para a atmosfera terrestre cerca de  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia, sendo 10.000 vezes maior que o consumo mundial de energia no mesmo período (PINHO e GALDINO, 2014). Assim, além de ser uma fonte inesgotável de energia, a energia solar tem enorme potencial para aplicação desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até em grandes usinas de energia solar concentrada.

Ao fazer o movimento de translação, a terra recebe a irradiação solar de maneira constante. A força dessa irradiação no nível da atmosfera é de  $1.367 \text{ W/m}^2$ , este valor também é denominado como “constante solar” (DUFFIE e BECKMAN, 2013). É refletida para a atmosfera uma fração desta irradiação, outra parte é absorvida por ela em forma de calor e, o restante, é novamente refletido para a atmosfera. O estado da atmosfera (nebulosidade, umidade do ar e a distância que os raios solares deslocam transpondo a atmosfera) influencia diretamente na divisão entre reflexão absorção e transmissão. Na Figura 1 é possível visualizar um diagrama simplificado com as principais interações do processo da radiação solar e térmica na atmosfera, sendo representado somente o efeito médio global de todos os processos. De uma região para a

outra e, também, de um período do ano para o outro, varia consideravelmente o valor de cada componente (GURNEY *et al.*, 1993).

Figura 1 – Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre



Fonte: Martins *et al.*, (2004).

Weiss e Spörk-Dür (2018), constataram que o Brasil tem uma área total de coletores solares instalados em operação de 13.649.887 m<sup>2</sup> tendo uma capacidade total de 9.555 MWth, os valores podem parecer altos, mas representam apenas 2,09% da produção mundial.

O Brasil apresenta grande capacidade para a utilização da energia solar. Sobre um território de 8.514.876.599 km<sup>2</sup> a irradiação solar global média incidente varia de 4,25 kWh/m<sup>2</sup>.dia a 6,5 kWh/m<sup>2</sup>.dia. Entre as várias localidades das diferentes regiões do país apresentam valores bem maiores que quando comparado com países europeus, onde já é bem implementada o aproveitamento da energia solar (MARTINS *et al.*, 2007).

A energia solar entra na terra nas formas luminosa e térmica. Ao atravessar a atmosfera terrestre, grande parte da energia solar pronuncia-se na forma de luz visível de raios infravermelhos e de raios ultravioletas. Assim, pode se realizar a captação dessa luz e transformá-la em energia elétrica, por meio de painéis fotovoltaicos (ANEEL, 2008).

A energia solar fotovoltaica utiliza-se de placas constituídas de materiais semicondutores para a conversão da radiação solar diretamente em eletricidade. Já a energia solar térmica concentrada, também conhecida como (*Concentrated Solar Power*), centrais termossolares ou centrais heliotérmicas, fazem uso de superfícies refletoras, onde concentram a radiação solar em um receptor, local em que ocorrerá a conversão energética (SILVESTRE, 2016).

### 2.2.1 Radiação solar

A radiação solar é o fluxo de energia emitido pelo sol e disseminada na forma de radiação eletromagnética, tendo registros de suas medições desde 1940. Neste período, foi visto uma queda de 4% na irradiância global (SIMIONI, 2017). Apenas uma parcela da radiação emitida pelo sol chega a alta atmosfera terrestre, sendo composta pela radiação direta, difusa e refletida (CANTOR, 2017). É denominada por albedo a parte refletida pelo solo para todas as direções e possui amplitude pequena.

A parcela não absorvida, refletida ou espalhada pela atmosfera, é a radiação direta, e incide diretamente na superfície (CARLESSO *et al.*, 2019). A radiação difusa é proveniente dos raios indiretos e dispersos pela atmosfera, dependendo basicamente das nuvens, variando bastante no tempo (ESTEVES, 2012).

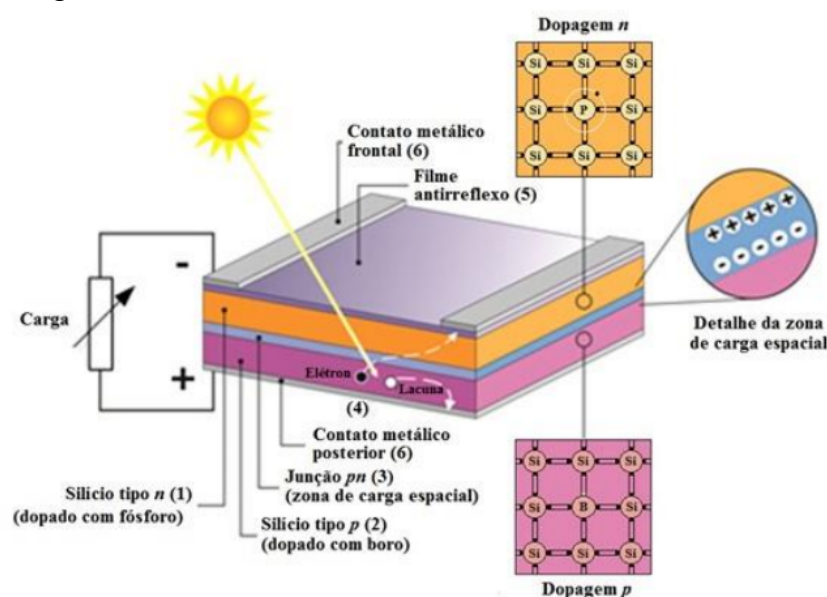
É de extrema importância a medição da radiação solar na superfície terrestre para estudos de climatologia, meteorologia e aplicações solares (LOPES, 2016). É fundamental para a quantificação da radiação solar global planejadores de energia e sistemas de energia solar (ALMOROX *et al.*, 2020).

### 2.3. CÉLULA FOTOVOLTAICA

Obtém-se a energia solar fotovoltaica por meio das células fotovoltaicas, as quais, através do efeito fotovoltaico, fazem a conversão direta da luz em eletricidade. Esse efeito fotovoltaico é dado por meio de materiais semicondutores, sendo o silício o mais utilizado devido a sua abundância (PINHO e GALDINO, 2014).

Existem, dentro de uma célula de silício, duas camadas de impurezas: uma tende a absorver elétrons e a outra é dotada de uma abundância de elétrons. Quando as duas camadas entram em contato esta ação é chamada de junção pn (ALDABÓ, 2002) – é possível visualizar na Figura 2 a estrutura física de uma junção pn de uma célula fotovoltaica. No entanto, é necessário se conectar em série ou paralelo as células fotovoltaicas para se obter um módulo e, através da conexão de módulos, tem-se um painel solar fotovoltaico (PATEL, 2006).

Figura 2 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: Pinho e Galdino, 2014.

### 2.4 RASTREADORES SOLARES

Grande parte dos sistemas fotovoltaicos são feitos por módulos com ângulo fixo de inclinação. Nos módulos em inclinação fixa, não é possível maximizar a captação dos raios solares em todos os dias e meses do ano; assim, é preciso definir um ângulo que proporcione uma produção média razoável de energia ao longo de sua utilização. Desta forma, a escolha

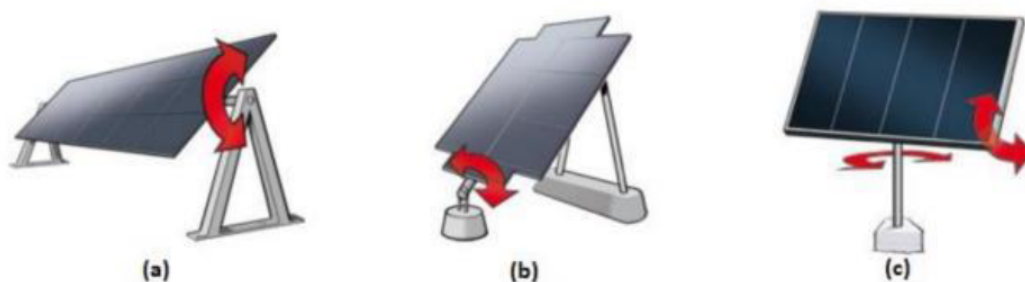
incorreta do ângulo de inclinação reduz a produção de energia elétrica, bem como a sua eficiência energética (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Para melhorar a captação dos raios solares pelo módulo fotovoltaico, há sistemas que seguem o movimento do Sol, por meio de equipamentos e estruturas de seguimento de um ou dois eixos. O seguidor solar possibilita que o ângulo de incidência dos raios solares seja perpendicular ao plano do módulo, sempre. Essa opção é mais empregada em centrais fotovoltaicas, onde os módulos estão sobre o solo (TOLMASQUIM, 2016).

O sistema de rastreamento solar tem grande importância nas aplicações da energia solar, aumentando os ganhos de potência e eficiência em comparação aos sistemas fixos e também nas análises econômicas das implementações em larga escala de energia solar (HAFEZ; YOUSEF; HARAG, 2018).

Em um sistema de rastreamento, a sua complexibilidade pode variar conforme o número de eixos usados para mover os módulos solares fotovoltaicos, na vertical, na horizontal ou em ambos. Portanto, quando a rotação ocorre em apenas um eixo, a movimentação será sentido norte-sul ou leste-oeste, compensando o deslocamento do sol em decorrência da rotação diária da Terra. Já o sistema de rastreamento com dois eixos, pode ser empregado na vertical e na horizontal, simultaneamente (VIEIRA, 2014; AL-ROUSAN; ISA; DESA, 2018). A Figura 3 exibe o sistema de rastreamento com apenas um eixo e em dois eixos.

Figura 3 – Rastreador solar em um eixo (a e b) e em dois eixos (c)



Fonte: Silva, Gouveia e Urbanetz Jr., 2018.

As formas mais eficazes de melhorar a produção anual de energia é a utilização do rastreamento solar de um eixo e verificar a eficiência do módulo (YU *et al.*, 2019). Os rastreadores de eixo único, quando instalados em regiões equatorianas, exibem uma maior eficiência, onde não tem grande influência anual na posição do sol à sazonalidade das estações (DEEPTHI *et al.*, 2013).

O rastreador de eixo único pode ser posicionado verticalmente, horizontalmente ou inclinados, com orientação no sentido Leste-Oeste ou no sentido Norte-Sul. Possuem um custo menor, bem como menor complexibilidade de controle e de sua mecânica, mas tem uma menor eficiência, por seu rastreamento ser feito em apenas um sentido (BARBOSA, 2016).

Mesmo que os sistemas de rastreamento de eixo único (Norte-Sul) exibam um custo de instalação 8% maior em comparação aos sistemas de inclinação fixa, o aumento na produção de energia supera o custo adicional (de 10 a 15%) e ocasiona em um custo nivelado mais baixo de eletricidade (YU *et al.*, 2019).

No sistema de rastreamento em dois eixos, é realizado o posicionamento correto do painel dependendo da sazonalidade das estações e pelo acompanhamento diário no sentido leste-oeste, compensando o deslocamento do sol em função da translação anual da Terra em sua órbita (FROSI *et al.*, 2018).

Os sistemas de circuito fechado (dois eixos) exibem um rastreamento mais preciso que os circuitos abertos (um eixo), mas seu consumo energético é maior por possuírem uma maior quantidade de componentes (LOSCHI *et al.*, 2015).

### 3. METODOLOGIA CIENTÍFICA

Este trabalho foi desenvolvido trazendo dados quantitativos de sistemas de captação de energia elétrica por meio de uma monografia e um artigo publicado relacionados ao sistema de captação de energia solar, cujo autores obtiveram resultados que foram abordados, bem como realizado um estudo comparativo entre os sistemas de captação solar.

Já que existem sistemas diferentes de rastreamento solar para a placa fotovoltaica, optou-se por analisar dois estudos que utilizaram o mesmo sistema de rastreamento. As pesquisas utilizadas como referência para este estudo comparativo foram a de Dhanabal *et al.* (2013), desenvolvida na Índia, e a de Trevelin (2014), desenvolvida no Brasil. O sistema utilizado em ambas as pesquisas foi a instalação de resistores dependentes de luz, conhecidos pela sigla LDR (*Light Dependent Resistor*), sendo este um componente eletrônico que sofre alterações na resistência conforme a variação da intensidade da luz incide sobre ele (PUTRI E ARYZA, 2018). Outro fator importante é que, em ambas as pesquisas, foram realizadas as comparações de eficiência entre o sistema de captação solar fixo, o sistema de captação com rastreamento do sol durante o dia (eixo único) e o sistema de captação com rastreamento do sol durante o dia e, também, conforme a variação da posição solar durante as estações do ano (eixo duplo).

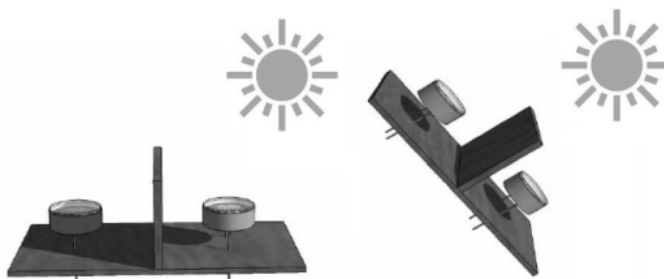
Visto que os estudos foram feitos em países diferentes, optou-se por fazer a comparação em cima do percentual de acréscimo de geração de energia em relação ao painel fixo de cada estudo. Assim, embora as pesquisas tenham gerações de energia diferentes, foi verificado apenas se a inserção do sistema de rastreamento solar de eixo único e duplo resultou em acréscimo na geração de energia em relação ao painel fixo. Os autores levantaram dados de geração de energia elétrica e incidência solar média na região e obtiveram dados identificando as eficiências de cada modelo de captação solar. As pesquisas analisadas são descritas a seguir.

#### 3.1 PESQUISA 1

A Pesquisa 1 foi desenvolvida por Dhanabal *et al.* (2013), este estudo apresentou uma pesquisa comparativa de eficiência solar entre sistemas de captação solar fixo, com um eixo único e um eixo duplo de rastreamento solar. O estudo foi realizado na cidade de Vellore, na Índia. Os dados levantados na pesquisa têm, aproximadamente,  $1.999 \text{ W/m}^2$  no plano horizontal.

O sistema de rastreamento de eixo único é composto por um par de posicionados em cada lado do painel. Com a variação da intensidade dos raios solares, um dos lados do LDR fica sombreado e outro é iluminado. O LDR que apresentar uma intensidade de radiação solar maior, envia um sinal mais forte ao controlador que, por sua vez, envia um sinal ao motor para girar o painel na direção em que exibe uma intensidade superior, conforme é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura par de LDR



Fonte: Barsoum; Vasant, 2010.

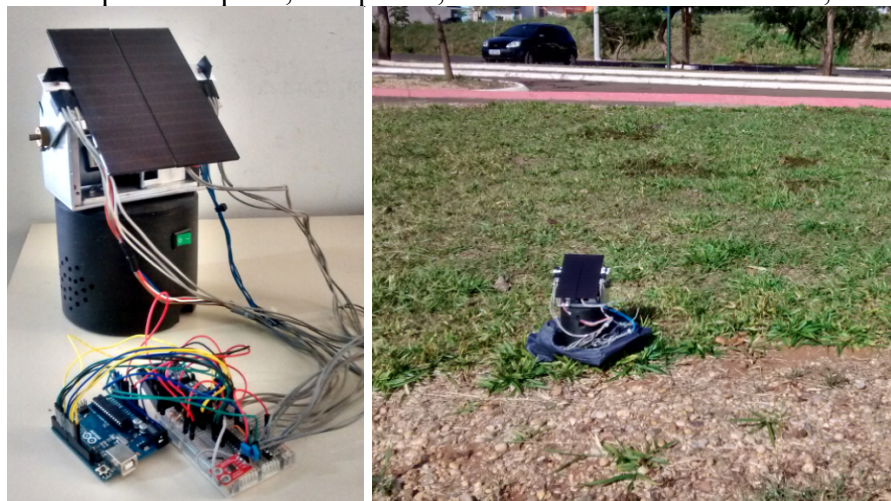
Para o sistema de rastreamento de eixo duplo são empregados dois pares de LDR's, dois motores e um controlador. Os dois pares de LDR's são colocados em quatro direções diferentes. Um conjunto composto por um motor e sensores são utilizados para inclinar o rastreador na direção leste-oeste do Sol e outro conjunto com os mesmos componentes é utilizado para inclinar o rastreador na direção norte-sul do Sol. O controlador detecta o sinal dos LDR's e envia o comando para o motor girar o painel a direção respectiva.

### 3.2 PESQUISA 2

A Pesquisa 2 foi desenvolvida por Trevelin (2014). O autor realizou um estudo comparativo entre sistemas de rastreamento solar e, para isso, construiu um sistema fotovoltaico que realizava o rastreamento solar com um ou dois eixos ou na forma de um sistema fixo. Foram analisadas as alterações na energia gerada e consumida pelo sistema para cada configuração.

O pesquisador fez dois protótipos, sendo o primeiro deste (Protótipo 1) compreendido por apenas o sistema de rastreamento solar, sem o seu acoplamento em painéis fotovoltaicos. O sistema de rastreamento solar era formado por um par de LDR e utilizou-se de servo motores de baixo custo, os quais eram capazes de suprir as necessidades do sistema. Seu teste compreendeu a verificação do funcionamento do circuito do rastreador, observando seu comportamento em diferentes circunstâncias de incidência solar ou iluminação interna, e efetuando ajustes, se necessário, para compensar a imprecisão do par LDR.

Figura 5 – Protótipo 2 completo, à esquerda; e o sistema no local de testes, à direita



Fonte: Trevelin, 2014.

O segundo protótipo (Figura 5) era composto por um sistema fotovoltaico quase completo em escala reduzida. Este sistema possui um rastreador solar de eixo duplo, podendo eliminar a mobilidade em 1 ou nos 2 eixos, para efetuar testes comparativos entre os métodos de rastreamento. Para coleta de dados foi empregado o aplicativo *Android Serial Monitor Lite* que permitia gravar toda a comunicação na memória do smartphone. Os parâmetros da placa fotovoltaica são mostrados na Tabela 1.

Potência Máxima ( $P_{max}$ )	0,36 W
Tensão Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	10,99 V
Corrente Curto Circuito ( $I_{sc}$ )	0,060 A
Tensão Potência Máxima ( $V_{mp}$ )	8,96 V
Corrente Potência Máxima ( $I_{mp}$ )	0,040 A
Dimensões	152 x 55 x 3 mm

Fonte: Trevelin, 2014.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 PESQUISA 1

As leituras do painel fotovoltaico fixo, do painel fotovoltaico com rastreador de eixo único e do painel fotovoltaico com rastreador de eixo duplo, foram feitas para um único dia, das 8h da manhã às 18h da noite, a cada hora. Dhanabal *et al.* (2013) utilizaram o software MATLAB para analisar os dados. A tensão, a corrente e a potência obtida para os três arranjos estudados para cada hora, são apresentados da Tabela 2, 3 e 4; e, no Gráfico 1, são apresentadas as potências médias encontradas para cada sistema.

Tabela 2 – Dados obtidos para o painel fotovoltaico fixo

Horário	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
8h	8,4	0,6	5,04
9h	8,5	1,17	9,94
10h	8,6	1,25	10,75
11h	9,7	1,82	17,65
12h	9,9	2,22	21,97
13h	10,3	2,56	26,36
14h	10,5	2,97	31,18
15h	9,7	2,71	26,28
16h	8,6	2,5	21,5
17h	8,3	2,14	17,76
18h	8,1	1,43	11,58

Fonte: Dhanabal *et al.*, 2013.

Tabela 3 – Dados obtidos para o painel fotovoltaico com rastreamento em eixo único

Horário	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
8h	9,15	1,7	15,6
9h	9,45	1,78	16,86
10h	9,7	1,99	19,3
11h	9,85	2,38	23,44
12h	10,2	2,7	27,54
13h	10,8	3,2	34,29
14h	10,7	3,05	32,68
15h	10,25	2,93	30,08
16h	9,8	2,63	25,77
17h	9,25	2,43	22,47
18h	8,75	1,87	16,4

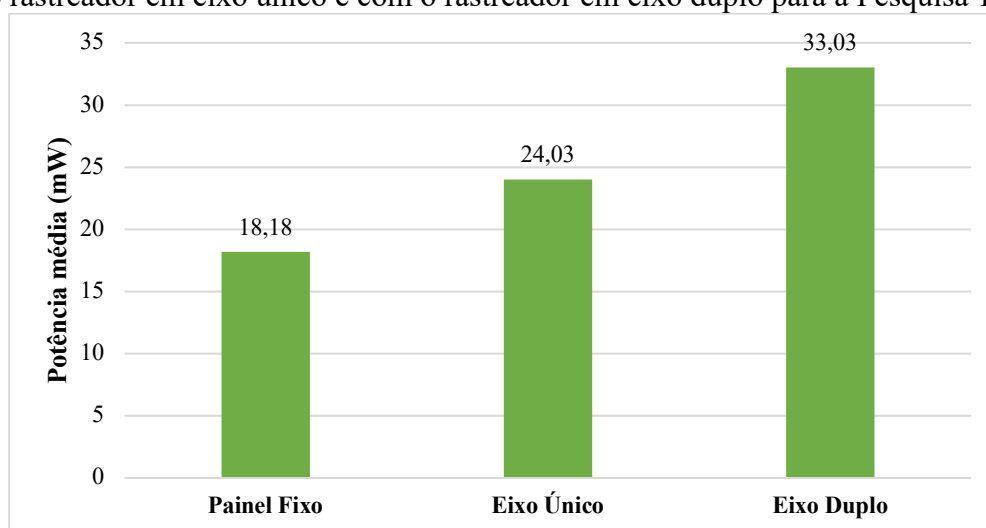
Fonte: Dhanabal *et al.*, 2013.

Tabela 4 – Dados obtidos para o painel fotovoltaico com rastreamento em eixo duplo

Horário	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
8h	10,2	2,93	29,88
9h	10,35	3,02	31,25
10h	10,42	3	31,26
11h	10,51	3,23	33,94
12h	10,6	3,2	33,92
13h	10,8	3,35	36,18
14h	10,73	3,41	36,58
15h	10,4	3,29	34,21
16h	10,55	3,3	34,81
17h	10,36	3,12	32,32
18h	10,29	2,82	29,01

Fonte: Dhanabal *et al.*, 2013.

Gráfico 1 – Potência média apresentada para o sistema com o painel fotovoltaico fixo, com o rastreador em eixo único e com o rastreador em eixo duplo para a Pesquisa 1

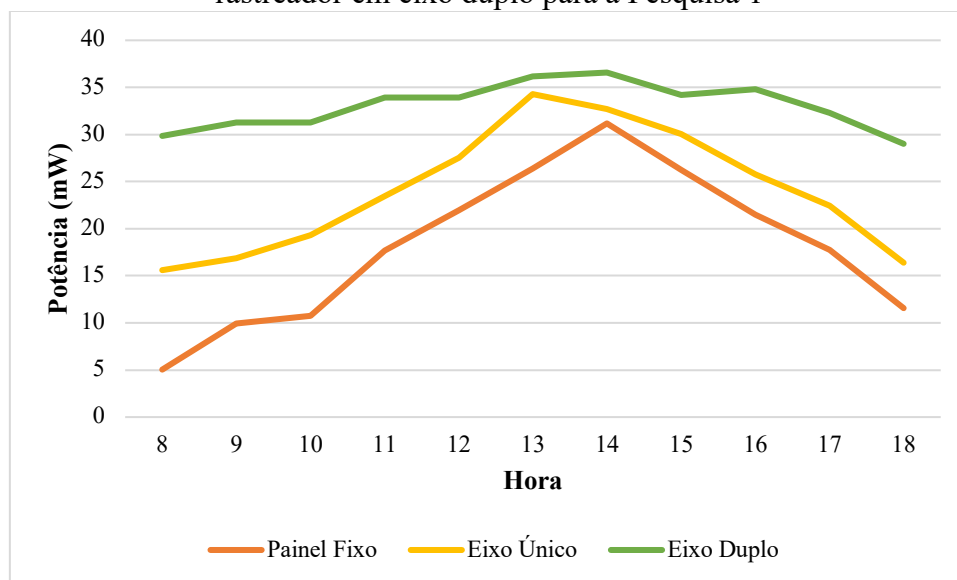


Fonte: Dhanabal *et al.*, 2013.

É possível observar com os resultados que, ao inserir o rastreador solar no painel fotovoltaico fixo, a potência média do sistema aumentou, assim é correto afirmar que a inserção do sistema de rastreamento solar aumentou a eficiência da geração de energia. Este aumento foi de 32,17% em relação ao rastreador de eixo único e de 81,68% em relação ao rastreador de eixo duplo.

O sistema proposto com o rastreador em eixo duplo é mais eficiente que o rastreador em eixo único, apresentando uma eficiência 37,45% superior. Dhanabal *et al.* (2013) explicam que, essa desvantagem do sistema com o rastreador em eixo único em relação ao de eixo duplo, deve-se ao fato do rastreador solar só rastrear o movimento diário do sol, não rastreando o sol no seu movimento anual e, também, que sua eficiência é reduzida em dias nublados pelo fato de o sistema só rastrear o movimento Leste-Oeste do sol. No Gráfico 2 é possível analisar o diagrama para a potência gerada de cada sistema para cada hora.

Gráfico 2 -Potência gerada por hora para o sistema fixo, com rastreador em eixo único e rastreador em eixo duplo para a Pesquisa 1



Fonte: Dhanabal *et al.*, 2013.

## 4.2 PESQUISA 2

Mediu-se a tensão e a corrente que o painel entregava ao sistema e o nível de carga da bateria, das 8h até às 18h, em intervalos de 10 minutos. Após cada medida, o rastreador (quando empregado) corrigia a posição do painel para a de maior incidência solar. Trevelin (2014), realizou o ensaio 3 vezes, utilizando primeiramente dois eixos, um eixo e com o painel fixo para a posição que apresentou maior incidência por mais tempo durante os testes anteriores, em dias ensolarados e sem nuvens, com temperatura média de 26° C, com 50% da carga total da bateria. A tensão, a corrente e a potência obtida para os três arranjos estudados para cada hora, são apresentados da Tabela 5, 6 e 7; e, no Gráfico 3, são apresentadas as potências médias encontradas para cada sistema.

Tabela 5 – Dados obtidos para o painel fotovoltaico fixo

Horário	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8h	7,895	0,02	0,16
9h	8,208	0,025	0,211
10h	8,401	0,037	0,31
11h	8,587	0,044	0,383
12h	8,644	0,061	0,535
13h	8,754	0,079	0,691
14h	8,594	0,058	0,498
15h	8,48	0,043	0,369
16h	8,298	0,036	0,3
17h	8,193	0,028	0,231
18h	8,001	0,016	0,129

Fonte: Trevelin, 2014.

Tabela 6 - Dados obtidos para o painel fotovoltaico com rastreamento em eixo único

Horário	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8h	8,183	0,029	0,242
9h	8,4	0,035	0,296
10h	8,395	0,05	0,424
11h	8,616	0,063	0,544
12h	8,7	0,073	0,642
13h	8,895	0,075	0,67
14h	8,585	0,071	0,617
15h	8,616	0,064	0,559
16h	8,401	0,054	0,46
17h	8,185	0,047	0,388
18h	8,199	0,04	0,334

Fonte: Trevelin, 2014.

Tabela 7 - Dados obtidos para o painel fotovoltaico com rastreamento em eixo duplo

Horário	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8h	8,59	0,054	0,465
9h	8,591	0,061	0,53
10h	8,7	0,064	0,559
11h	8,889	0,074	0,659
12h	9,014	0,075	0,679
13h	9,002	0,079	0,718
14h	8,911	0,079	0,707
15h	8,794	0,076	0,669
16h	8,691	0,065	0,565
17h	8,504	0,06	0,516
18h	8,6	0,037	0,325

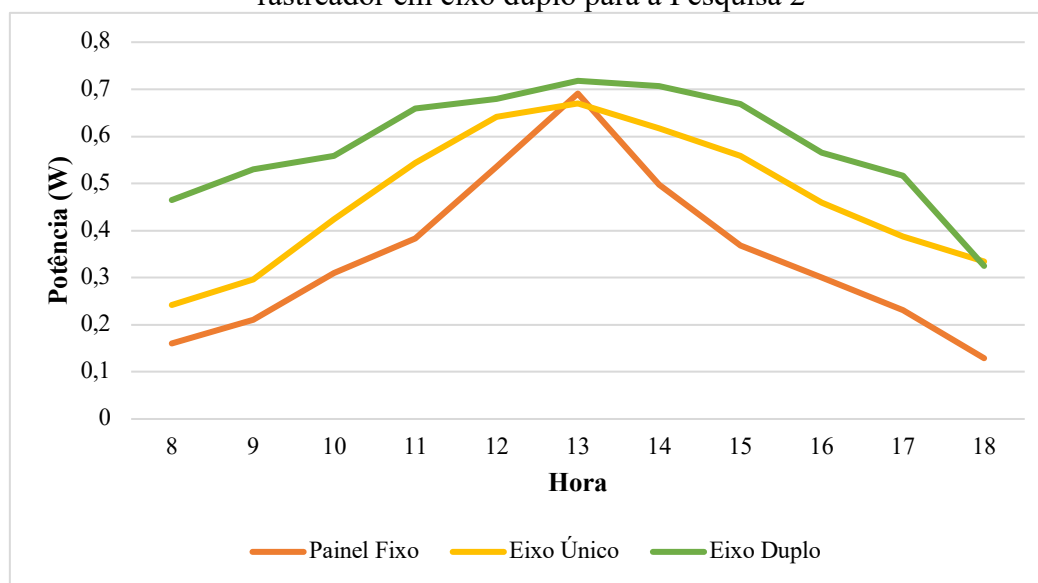
Fonte: Trevelin, 2014.

Gráfico 3 - Potência média apresentada para o sistema com o painel fotovoltaico fixo, com o rastreador em eixo único e com o rastreador em eixo duplo para a Pesquisa 2.



Fonte: Trevelin, 2014.

Gráfico 4 – Potência gerada por hora para o sistema fixo, com rastreador em eixo único e rastreador em eixo duplo para a Pesquisa 2



Fonte: Trevelin, 2014.

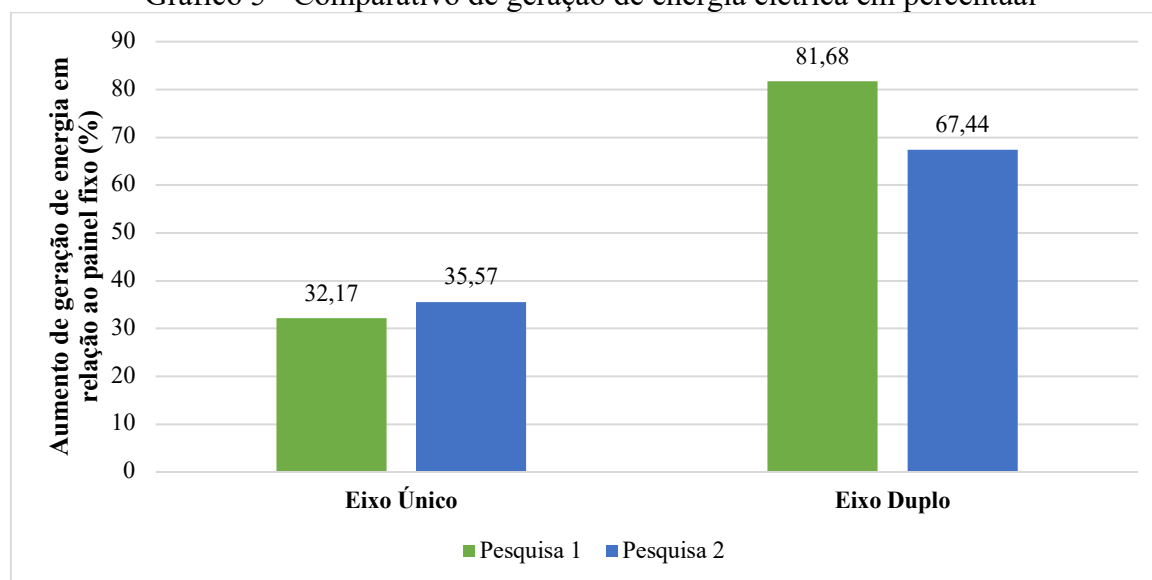
Para o sistema de captação solar fixo, o valor da média de geração de energia elétrica foi de 0,347 W. No sistema de captação solar de eixo único foi de 0,471 W. Para o sistema de captação solar de eixo duplo foi de 0,581 W.

Através desses dados, pode-se obter o percentual de aproveitamento entre os dados exibidos. Para o sistema de rastreamento de eixo duplo em comparação com o de eixo fixo, a geração de energia elétrica aumentou em 67,44%; já para o de eixo único em comparação ao de eixo fixo, o aumento foi de 35,57%. Em comparação entre o sistema de rastreamento de eixo duplo com o de eixo único, o aumento na geração de energia elétrica foi de 23,35% (TREVELIN, 2014).

### 4.3 COMPARTIVO ENTRE AS PESQUISAS

Para comparar os dados obtidos em cada trabalho, foi realizado o percentual de aumento de geração de energia em relação ao painel fotovoltaico fixo em relação ao rastreador com eixo único e com o rastreador em eixo duplo. Esta comparação está exemplificada no diagrama apresentado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Comparativo de geração de energia elétrica em percentual



Fonte: Autor, 2022.

É possível afirmar que, tanto para a Pesquisa 1 (Dhanabal *et al.*, 2013), quanto para a Pesquisa 2 (Trevelin, 2014), a inserção do rastreador solar na placa fotovoltaica contribuiu para o aumento da geração de energia, ainda mais quando utilizado o rastreador com eixo duplo.

A média encontrada de aumento de geração de energia do painel fixo em relação ao eixo único foi de 33,87% e em relação ao de eixo duplo foi de 74,56%.

Observou-se que, em ambos os estudos, o sistema que utilizava o rastreamento solar de eixo duplo apresentou melhor desempenho quando comparados com o de eixo fixo e o de eixo único. Nota-se que o aumento de geração é mais expressivo na Pesquisa 1, com 81,68%, que na Pesquisa 2, 67,44%; ou seja, essa diferença é dada devido a localização geográfica em que se encontra os painéis fotovoltaicos. A Índia recebe uma irradiação solar ao longo do ano de 4 a 7 kWh/m<sup>2</sup> (Sudhakar *et al.*, 2013). No Brasil, a irradiação solar ao longo de um ano é de 4,1 a 6,5 kWh/m<sup>2</sup> e qualquer parte do território brasileiro (Da Rosa e Gasparin, 2016).

## 5. CONCLUSÃO

Através dos resultados das pesquisas, pode-se observar a diferença que a introdução do rastreador solar agrega ao sistema fotovoltaico. A eficiência de geração de energia, na Pesquisa 1, aumentou em 32,17% para o eixo único e, em 81,68%, para o eixo duplo. Na Pesquisa 2, o aumento de geração de energia entre o eixo duplo e o eixo fixo foi de 67,44%, já entre o eixo único e o eixo fixo foi de 35,57%; e, entre o eixo duplo e o eixo único foi de 23,35%. Comparando as duas pesquisas, a geração de energia teve uma média de aumento do painel fixo em relação ao eixo único de 33,78% e, em relação ao de eixo duplo, foi de 74,56%.

Em ambas pesquisas, o sistema de eixo duplo de rastreamento solar apresentou o melhor desempenho em comparação com o de eixo fixo e o de eixo único. A Pesquisa 2 alcançou o

maior aumento de desempenho, devido ao fato que o estudo foi realizado na Índia, onde a irradiação solar anual tende a ser superior à irradiação solar anual do Brasil.

Deste modo, o trabalho alcança seu objetivo de realizar a comparação entre os sistemas com eixo fixo, eixo único e eixo duplo. Conclui-se, portanto, que o emprego de rastreadores solares em sistemas de geração fotovoltaica, aumenta a geração de energia elétrica, além disso, o rendimento adicional proporcionado é bem expressivo e o consumo adicionado pelo rastreador é revertido pelo ganho energético. A utilização do rastreador em sistemas fica em função de custos como instalação, manutenção e a adequação do local de instalação ou devido a condições climáticas regionais.

## REFERÊNCIAS

ADALBÓ, R. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília: ANEEL, 2008.

ALMOROX, J.; ARNALDO, J. A.; NADJEM, B.; MARTÍ, P. Adjustment of the Angstrom-Prescott equation from Campbell-Stokes and Kipp-Zonen sunshine measures at different timescales in Spain. **Renewable Energy**, v. 154, p. 337-350, 2020.

AL-ROUSAN, N.; ISA, N. A. M.; DESA, M. K. M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2548-2569, 2018.

AQUILA, G.; PAMPLONA, E. O.; QUEIROZ, A. R.; ROTELA JUNIOR, P.; FONSECA, M. N. (2017) An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 70, p. 1090-1098, 2017.

BARBOSA, D. A. **Análise energética e financeira de um dispositivo de seguimento solar para a geração fotovoltaica**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BARSOUM, N.; VASANT, P. Simplified solar tracking prototype. **Global Journal on Technology & Optimization**, v. 1, 2010.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciência**, Caracas, v. 43, n. 10, p. 680-688, out. 2018. Mensal.

BRAGA, R. P. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. 2008. 80p. - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional: ano base 2021**. Rio de Janeiro, 2021. 264p. Acesso em: 30 set. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>

CANTOR, G. A. R. **Influência dos fatores climáticos no desempenho de módulos fotovoltaicos em regiões de clima tropical**. 2017. 177p. Dissertação (Mestrado) – Centro de

Energias Alternativas e Renováveis - Departamento de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

CARLESSO, F., GÓMEZ, J. M. R., VIEIRA, L. E. A., SAVONOV, G. S., BERNI, L. A., COSTA, L. L. Conceitos básicos de radiômetros de substituição elétrica para medidas da irradiância solar total. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São José dos Campos, v. 41, n. 2, p. e20180220-1- e20180220-10, 2019.

COLLAÇO, F. M. A.; BERMANN, C. Perspectivas da Gestão de Energia em âmbito municipal no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 89, n. 31, p. 213-235, 2017.

DA ROSA, A. R. O.; GASPARIN, F. P. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista brasileira de energia solar**, v. 7, n. 2, p. 140-147, 2016.

DEEPTHI, S.; PONNI, A.; RANJITHA, R.; DHANABAL, R. Comparison of Efficiencies of Single-Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)**, v.2, n. 2, p. 425-430, 2013.

DHANABAL, R.; BRAHATHI, V.; RANJITHA, R.; PONNI, A.; DEEPTHI, S.; MAGESHKANNAN, P. Comparison of efficiencies of solar tracker systems with static panel single-axis tracking system and dual-axis tracking system with fixed mount. **International Journal of Engineering and Technology**. v. 5, n. 2, p. 1925 – 1933, 2013.

DIAS, C. L. D. A., BRANCO, D. A. C., AROUCA, M. C., LEGEY, L. F. L. Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. **Renewable Energy**, v. 114, p. 367-375, 2017.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. Canadá: Wiley, 2013. 928 p.

ESTEVES, M. F. S. **Centrais fotovoltaicos em habitações unifamiliares**. 2012. 231p. Dissertação (Mestrado) – Curso Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2012.

PATEL, M. R. **Wind and solar power systems: design, analysis, and operation**. 2 ed. Florida, Estados Unidos: CRC Press, 2006.

Major Energia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

FROSI, F.; CHESINI, D.; GABE, I. J.; BONA, J. C. Análise comparativa da produção de energia de um seguidor solar de dois eixos para a região de Farroupilha-RS. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 7., 2018, Gramado. **Anais**. Gramado: Cbens, 2018. p. 1 - 9.

GÓMEZ, J. M. R., CARLESSO, F., VIEIRA, L. E., DA SILVA, L., A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 40, n. 3, p. e3312-1 a e3312-12, São Paulo, 2018.

GREENPRO. **Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projectos e instalação**. Lisboa, 2004, v. 2. Disponível em:<<https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2022.

GURNEY, R. J.; FOSTER, J. L.; PARKINSON, C. L. **Atlas of satellite observations related to global change**. Cambridge University Press, Cambridge; Nova York, 1993.

HAFEZ, A. Z.; YOUSEF, M. A.; HARAG, M. N. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 91, p. 754-782, 2018.

HEINZ, D B. **Sistema de rastreamento solar microcontrolado para obtenção da máxima radiação em sistemas fotovoltaicos**. 2016. 41p. Trabalho de Conclusão de Curso ( Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa. 2016.

LIMA, F. J. L. **Previsão de irradiação solar no Nordeste do Brasil empregando o modelo WRF ajustado por redes neurais artificiais (RNAs)**. 2015. 252p. Tese (Doutorado) – Departamento de Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.

LOPES, D. D. D. **Desenvolvimento e implementação de um Sistema de Seguimento Solar Ativo para sistemas fotovoltaicos**. 2016. 76p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências, Departamento e Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

LOSCHI, H. J.; IANO, Y.; LEÓN J.; MORETTI, A.; CONTE, F. D.; BRAGA, H. A Review on Photovoltaic Systems: Mechanisms and Methods for Irradiation Tracking and Prediction. **Smart Grid and Renewable Energy**, 6, p. 187-208, 2015.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. **Satellite-derived solar resource maps of Brazil under SWERA Project**. *Solar Energy*, v. 81, n. 4, p. 517-528, 2007.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004.

MORAIS, L. C. **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras**. 2015. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia. Bauru, 2015.

PEREIRA, E.B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1.ed. São José dos Campos: INPE, 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A.; Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES). CEPEL - CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

PINTO, A.; MACAGNAN, M.; ZILLES, R.; LEHMANN, J. Descrição de seguidores solares e sua aplicação em centras fotovoltaicas conectadas à rede. **Anais**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2010.

PUTRI, M.; ARYZA, S. Design of security tools using sensor light dependent resistor (LDR) through mobile phone. **International Journal for Innovative Research in Multidisciplinary Field**, v. 4, n. 10, p. 168 – 173, 2018.

RACHARLA, S.; RAJAN, K. Solar tracking system - a review. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 10, n. 2, p. 72 - 81, 2017.

SILVA, F. B. F.; GOUVEIA, D. C.; URBANETZ JUNIOR, J. Análise da demanda de potência consumida por rastreadores solares automatizados. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, 2018.

SILVEIRA, P. G. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. **Opini3n Jur3dica**, Medell3n, Col3mbia, v. 17, n. 33, p.123-147, 2018.

SILVESTRE, A. D. **Desenvolvimento de heliostato para gera3n heliot3rmica em torres solares**. 2016. 84 f. Disserta3n (Mestrado) – Programa Centro de Energias Alternativas e Renov3veis, Universidade Federal da Para3ba, Jo3o Pessoa, 2016.

SIMIONI, T. **O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil**. 2017. 222p. Disserta3n (Mestrado) – Programa de Planejamento Energ3tico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SOUZA, V. O.; ANDRADE, H. D.; BARRETO, E. L. F. **Crescimento da gera3n de energia fotovoltaica na regi3o nordeste do Brasil**. 2020. 11p. Trabalho de Conclus3o de Curso – Universidade Federal Rural do Semi-3rido, 2020.

SUDHAKAR, K.; SRIVASTAVA, T.; SATPATHY, G.; PREMALATHA, M. Modelling and estimation of photosynthetically active incident radiation based on global irradiance in Indian latitudes. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2013.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renov3vel: Hidr3ulica, Biomassa, E3lica, Solar, Oce3nica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

TREVELIN, F. C. **Estudo comparativo entre m3todos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos**. 2014. 67p. Trabalho de Conclus3o de Curso (Engenharia El3trica) – Universidade de S3o Paulo, S3o Carlos, 2014.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribui3n urbanas: sua influ3ncia na qualidade da energia el3trica e an3lise dos par3metros que possam afetar a conectividade**. 2010. 189f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florian3polis, 2010.

VELLOSO, M. F. A. **Possibilidade de gera3n h3brida hidrosolar na Bacia do S3o Francisco**. 2017. 175p. Tese (Doutorado) – Curso Ci3ncia do Sistema Terrestre, Instituto de Pesquisas Espaciais, S3o Jos3 dos Campos, 2017.

VIEIRA, R. G. **An3lise comparativa do desempenho entre um painel solar est3tico e com rastreamento no munic3pio de Mossor3-RN**. 2014. 86p. Disserta3n (Mestrado) - Curso de Sistemas de Comunica3n e Automa3n, Universidade Federal Rural do Semi-3rido, Mossor3, 2014.

VILLALVA, M G., GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplica3es**. 1 ed. S3o Paulo: Editora 3rica, 2012.

WEISS, W.; SPÖRK-DÜR, M. **Solar Heat Worldwide** – Global Market Development and Trends in 2017/Detailed Market Figures 2016. 2018 ed. Austria: AEE INTEC, 2018.

YU, Z. J.; FISHER, K. C.; MENG, X.; HYATT J. J.; ANGEL, R. P.; HOLMAN, Z. C. GaAs/silicon PVMirror tandem photovoltaic mini-module with 29.6% efficiency with respect to the outdoor global irradiance. **Progress in Photovoltaics**. v. 27, p. 469-475, 2019.