

Potencializador de Captação de Raios Solares: Espelhos Móveis para o Redirecionamento da Irradiação Solar Aplicados em Módulos Fotovoltaicos.

Lissandra Souza Silva*. Marcos Borges Conceição*. Flávio Couvo Teixeira Maia*. Márcio da Silva Pereira Bove*. Reginaldo Barnabé Gonzales Grimaldi*.

* Departamento de Engenharia Elétrica, Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana. Av. Luís, Av. Eduardo Magalhães Subaé - Aviário, Feira de Santana - BA, 44079-002. E-mails: lis@atrib.com.br, mbcon2@gmail.com, flaviocouvo.engele@gmail.com, marcioengeletronica@gmail.com, reginaldogrimaldi@gmail.com

Abstract: Despite its advantages and the continuous growth of photovoltaic energy in the market, photovoltaic modules still have low efficiency in the generation of electric energy, which, in fixed module systems, is aggravated by the fact that the solar rays do not fall perpendicularly on the modules, causing their potential not to be used to its fullest. Seeking to solve this problem, optimization strategies have been created to maximize the power generation capacity of these modules. To analyze the efficiency and technical feasibility of implementing mobile mirrors coupled to photovoltaic modules to increase the use of solar rays in photovoltaic generation and reduce the shading effect. For the development of this research, two prototypes were assembled: the first one is a physical model simulating a residence with the system of movable mirrors, automatically controlled, using an Arduino development board, and the second one was built with a kit of photovoltaic modules with a nominal power of 345 W and, coupled to it, a mirror that remains mobile, allowing the rotation and desirable inclination. From the data collected, an average optimization of 19.1% was obtained in the generation and reduction of 31.12% of the shading effect through the redirection of sunlight with the mirror.

Resumo: Apesar das vantagens e do contínuo crescimento da energia fotovoltaica no mercado, os módulos fotovoltaicos ainda apresentam baixa eficiência na geração de energia elétrica, que, em sistemas de módulos fixos, é agravada pelo fato dos raios solares não incidirem de forma perpendicular nos módulos, fazendo com que o potencial deles não seja aproveitado ao seu máximo. Buscando solucionar esse problema, estratégias de otimização vêm sendo criadas para o aproveitamento máximo da capacidade de geração de energia elétrica desses módulos. Então, o presente trabalho tem como objetivo analisar a eficiência e a viabilidade técnica da implementação de espelhos móveis acoplados a módulos fotovoltaicos, no intuito de aumentar o aproveitamento dos raios solares na geração fotovoltaica, e diminuir o efeito de sombreamento. Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram montados dois protótipos: o primeiro, trata-se de uma maquete física simulando uma residência com o sistema de espelhos móveis, controlados automaticamente, utilizando uma placa de desenvolvimento Arduino, e o segundo, construído com um kit de módulos fotovoltaicos com potência nominal de 345 W e, acoplado nela, um espelho que se mantém móvel, permitindo a rotação e inclinação desejável. A partir dos dados coletados, obteve-se, em média, uma otimização de 19,1% na geração e redução de 31,12% do efeito de sombreamento através do redirecionamento da luz solar com o espelho.

Keywords: Photovoltaic solar energy; shading effects; mirrors; photovoltaic modules; power generation optimization.

Palavras-chaves: Energia solar fotovoltaica; efeitos do sombreamento; espelhos; módulos fotovoltaicos; otimização da geração de energia.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, ao que pouco se vê reconhecido, perante a sociedade, é atualmente o segundo país mais bem colocado no rank do Anuário Estatístico da Energia Global (ENERDATA, 2021), representando com 84,1% de energias renováveis de toda sua matriz energética, um posicionamento superior a países como Nova Zelândia e Suécia.

Segundo Scherer *et al.* (2015), em 1839 o físico francês Alexandre Becquerel, descobriu o efeito fotovoltaico através de experimentos com aplicação do magnetismo do oxigênio líquido. De forma acidental, ele descobriu que a exposição de eletrodos de prata ou platina à luz gerava o efeito denominado fotovoltaico. Esta descoberta exerceu um papel fundamental para a produção da primeira célula fotovoltaica.

Nascimento (2004) aponta que o fenômeno do efeito fotovoltaico é caracterizado pela razão da célula fotovoltaica não possuir a capacidade de armazenar energia elétrica e sim apenas manter um fluxo de elétrons enquanto houver radiação sobre ela.

Um módulo fotovoltaico é constituído de células fotovoltaicas. Castro (2002) aborda que eles são produzidos à base de silício, porém é necessário que exista um campo elétrico para haver corrente elétrica, com base no processo no qual os fótons emitidos pelo sol chegam à célula fotovoltaica, fazendo com que os elétrons da camada de valência sejam excitados e saltem para uma camada mais externa, de acordo com a física clássica. Esse fluxo de elétrons em movimento forma a corrente elétrica, gerando energia denominada fotovoltaica.

Sistemas fotovoltaicos podem ser de dois tipos: *off-grid* e *on-grid*. No tipo *off-grid*, a energia é armazenada em baterias e convertida em CA através de inversores. O sistema não é conectado à rede elétrica externa. No tipo *on-grid*, a energia gerada passa por um medidor de bidirecional e o excedente gerado pelo sistema fotovoltaico é injetado na rede externa (BORTOLOTO et al., 2017).

Ao longo do ano, a inclinação do sol em relação à Terra e, conseqüentemente, aos hemisférios norte e sul, vai se modificando. Essa variação de inclinação influencia diretamente na variação do ângulo da radiação solar sobre a Terra. Alves (2010) explica que o ângulo em que os raios do sol atingem a superfície da Terra varia substancialmente com a latitude, sendo que uma superfície perpendicular a um feixe vertical receberá uma quantidade maior de radiação em relação às áreas nas quais os raios solares são oblíquos. Isso se dá pelo fato de os raios oblíquos serem sujeitos à menor insolação, pois são forçados a atravessarem uma camada mais espessa da atmosfera que reflete e absorve energia, espalhando a energia por uma área maior. Ainda segundo Alves (2010), o mesmo princípio ocorre em relação aos ângulos de emissão dos raios solares: ao meio-dia solar, a intensidade de insolação é superior; nas horas da manhã ou da tarde, quando o sol está numa angulação mais baixa, a quantidade de insolação reduz. Torres (2015) afirma que a acentuação do sol varia de acordo com a claridade da atmosfera e o ângulo em que a radiação solar incide sobre uma superfície (ângulo de incidência), ou seja, quanto mais perpendicular for este ângulo, maior será a energia transmitida. Com isso, para se obter uma maior eficiência de geração energética de um sistema fotovoltaico, é necessário alinhar o ângulo de inclinação dos módulos de forma a atingir o máximo de aproximação em 90° com os fótons emitidos pelo sol, pelo máximo de tempo possível.

Visando o aproveitamento maior dos raios solares na geração fotovoltaica, este trabalho teve como objetivo o estudo do redirecionamento dos raios solares para os módulos através de espelhos com ajuste de inclinação de acordo com a posição do sol, de forma a prover uma maior eficiência na geração de energia fotovoltaica ao longo do tempo, com maior incidência da irradiação solar, principalmente nos horários com menores angulações solares em relação à face do módulo, uma vez que o aproveitamento dos raios solares pela reflexão dos espelhos pode otimizar e potencializar a produção energética em cada módulo.

2. GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Segundo Vallera e Brito (2006), o efeito fotovoltaico foi descoberto por Edmond Becquerel no ano de 1839. Ele observou a produção de uma pequena diferença de potencial em placas metálicas constituídas de platina ou prata, quando mergulhadas em um eletrólito e exposta à luz. Já a primeira célula solar foi criada em 1953 quando o químico Calvin Fuller, da Bell Laboratories, elaborou um método para inserir impurezas em cristais de silício, dopando-os com uma mínima

quantidade de gálio, para torná-lo condutor. Ainda sobre os autores, um outro procedimento, realizado pelo físico Gerald Pearson, consistiu em imergir uma barra de silício em um banho quente de lítio, portadores com carga negativa, que entrou em contato com o silício “tipo p” (com carga positiva),

formando a “junção p-n”, observando-se um campo elétrico permanente nessa junção. Essa amostra foi exposta à luz, fazendo surgir uma corrente elétrica. Pearson, então, havia criado a primeira célula fotovoltaica de silício.

Com o passar dos anos, a eficiência das células solares aumentou, chegando em 1959 a 10%. No período, o preço das células solares era muito alto, sendo a primeira célula fotovoltaica disponível comercialmente custando \$25 (vinte e cinco dólares) com uma produção de 14 mW de potência, fazendo com que seu uso só fosse economicamente viável em aplicações muito específicas, como a geração de eletricidade em satélites (BRITO;SERRA, 2005).

Segundo Dienstmann (2009), na década de 1960, a ideia de usar o sol como fonte de energia foi abandonada devido aos baixos preços do petróleo e à conveniência dessa tecnologia. Devido à Guerra do Kippur, em 1973, o que elevou o preço do petróleo, muitos países passaram a buscar novamente a energia solar. Desde o início do século atual, a indústria tem voltado suas atenções para as energias limpas.

A CRESESB (2006) afirma que, em 1993, a geração fotovoltaica já havia atingido 60 MWp de potência gerada. Na classificação dos materiais mais utilizados, o silício é o mais utilizado, sendo desenvolvido em muitas formas, como cristal único, amorfo e policristalino, por exemplo.

3. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos ou painéis fotovoltaicos são compostos por várias células ligadas em série. Essas células captam a radiação solar e a transforma em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico. Existem muitas variedades de painéis fotovoltaicos no mercado com eficiência e custo diferentes, como: monocristalino, policristalino, silício amorfo, o telureto de cádmio (CdTe), o silício amorfo (a-Si), o arsenieto de gálio (GaAs), o disseleneto de cobre-índio e o cobre-índio-gálio-selenio, (CIGS) (JUNIOR, NICOLADELLI, 2019). Os módulos de filme fino podem ser em vezes mais finos que um módulo de silício cristalino. Por possuir essa vantagem, é usado em diversos tipos de estruturas, como fachadas de prédios, em telhas etc. Sua desvantagem está relacionada à eficiência menor que a dos módulos cristalinos (TITTON, M. G.; DE BONA, J. C.; BÜHLER, A. J, 2015). Na Figura 1 são ilustrados os tipos monocristalino e policristalino e na Figura 2, alguns módulos de filme fino.

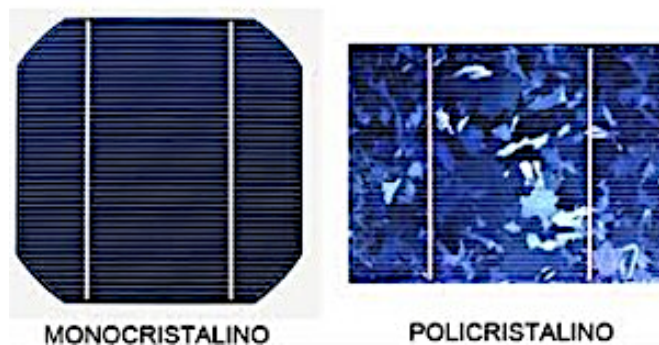


Fig. 1: Painéis do tipo monocristalino e policristalino. Fonte: (ECORI ENERGIA SOLAR, 2018).



Fig. 2: Módulos de filme fino. Fonte: (CANAL SOLAR, 2020).

A eficiência é um fator primordial para escolha de um modelo fotovoltaico. Em um projeto de um sistema fotovoltaico residencial, o espaço de instalação dos módulos é um dos fatores mais importantes, uma vez que a quantidade necessária de módulos, a depender da escolha do modelo, pode não ser aplicável no local, se o espaço não os comporta.

4. FATORES EXTERNOS QUE INFLUENCIAM NA GERAÇÃO

Os módulos fotovoltaicos possuem uma unidade específica para medição de potência, dada em watt-pico (Wp), que, na prática, é um valor máximo que a potência efetivamente gerada pelo módulo fotovoltaico pode fornecer. Assim, o valor estabelecido de potência-pico só pode ser alcançado nas condições padrão de operação feitas pelos fabricantes, como as Condições Padrão de Teste STC ou Condição Padrão de Teste (do inglês, *Standard Test Conditions*) (FEIJÓO, 2017).

4.1 Radiação Solar

A radiação solar nos módulos altera diretamente a geração do sistema fotovoltaico, sendo um dos principais fatores que prejudicam o barateamento da implementação desse sistema. Green et al. (2022) apresentam um relatório de eficiência das células fotovoltaicas de diversos materiais, como mostrado na Tabela 1 (com exceção dos módulos multijunção).

Tabela 1. Eficiência dos módulos fotovoltaicos

Tecnologia	Eficiência (%)
Si (cristalino)	26,1 ± 0,3
GaInP (filme fino)	22,0 ± 0,3
CdTe (filme fino)	22,0 ± 0,3
Filme fino orgânico	18,2 ± 0,2
CZTSSe (filme fino)	13,0 ± 0,1
CZTS (filme fino)	11,0 ± 0,2

Fonte: (GREE ET AL., 2022).

Segundo Moura (2017), a radiação solar que atinge a superfície da Terra é dividida em duas partes: direta (ou feixe) e difusa, conforme ilustrado na Figura 3. Ele define a radiação direta como a radiação que não se desviará de sua trajetória. Quanto à radiação difusa, ela é afetada pela atmosfera terrestre, sendo desviada por moléculas ou aerossóis nas nuvens, água e ar, difundindo seus componentes em várias direções. O

coeficiente de reflexão é considerado a refletividade de uma superfície e é medido pela razão entre a radiação refletida por uma superfície e a radiação incidente nela.

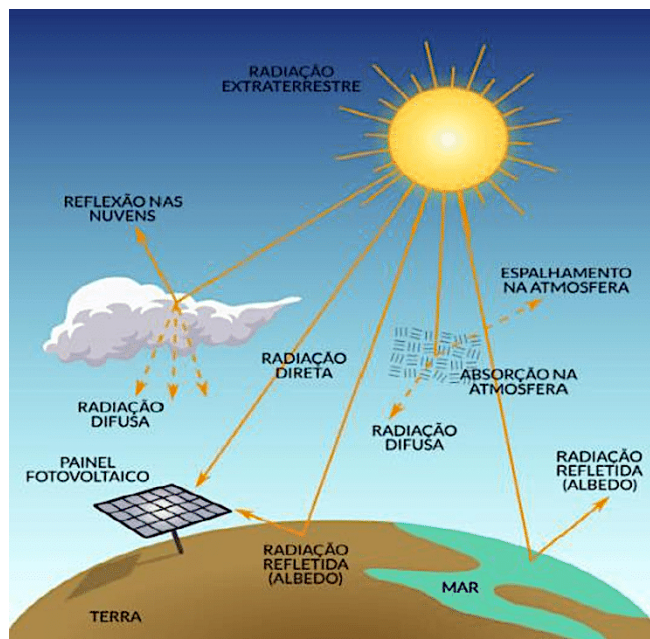


Fig. 3: Incidência da radiação na superfície terrestre. Fonte: (KRAUSE; AMENDOLA, 2021).

A eficiência das células fotovoltaicas é inversamente proporcional à temperatura do substrato, portanto, também inversamente proporcional à energia incidente na célula. Em suma: quanto mais energia solar aporta à célula, maior é sua temperatura e menor sua eficiência. Assim, com o objetivo de maximizar a eficiência da célula, deve-se buscar o maior valor que o fluxo de energia solar normal direta pode alcançar em um ano, sendo esse fluxo de energia estando diretamente relacionado com a radiação solar (CORRÊA, 2013).

A fim de aumentar o fluxo de energia solar, Iqbal (apud FERRONATO; SEVERO, 2018, p.2) abordam que é necessário conhecer a relação angular formada entre a posição aparente do sol no céu e as coordenadas da superfície terrestre, como é ilustrado na Figura 4. Para um bom posicionamento dos módulos fotovoltaicos, o eixo a ser levado em conta é definido pela posição do zênite local (θ_z), que depende da posição do observador. Esse eixo é normal em relação ao plano horizontal do observador e passa pelo centro da Terra, onde acima dele está o zênite e, no sentido inverso, é denominado nadir.

O ângulo horário solar (ω), também classificado como ângulo medido sobre o equador, desde o meridiano local até o meridiano do astro, refere-se ao deslocamento angular aparente do sol, causado pela rotação da Terra, variando entre -180° e $+180^\circ$. Cada hora corresponde a uma mudança de 15° no ângulo da hora solar. Nesse contexto, valores positivos representam a manhã, valores negativos a tarde e zero ao meio-dia. Já o ângulo azimutal solar pode ser definido como o ângulo estabelecido entre a linha de projeção direcionada ao sol no plano horizontal com o meridiano do observador. Seu ângulo pode diferenciar entre -180° e $+180^\circ$, sendo considerado valores positivos no sentido horário a partir da direção norte geográfico no meridiano local (INPE, 2017).

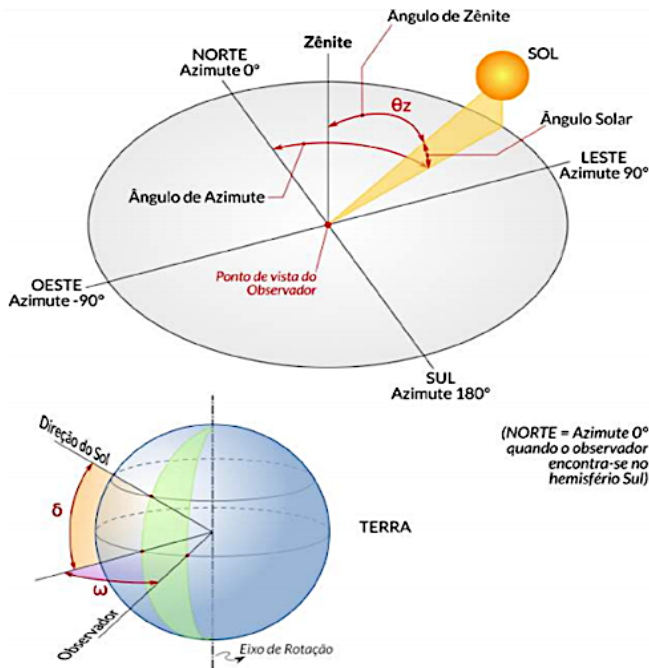


Fig. 4: Ângulos notáveis em solarimetria. Fonte: (INPE, 2017).

4.2 Orientação do módulo fotovoltaico

A orientação dos módulos fotovoltaicos contribui muito na eficiência do sistema. A Terra gira em torno do seu eixo (movimento de rotação) e o sol realiza uma trajetória, em relação à Terra, do leste ao oeste. Essa trajetória muda conforme as estações do ano, tendo o inverno como a estação com menor radiação (JURINIC, 2020).

Quando os raios solares atingem a superfície de forma não perpendicular, sua intensidade luminosa é distribuída por uma área maior, de forma que a potência da incidência solar por metro quadrado na superfície diminui (SHAYANI apud CAMPOS, ALCANTARA, 2016, p.574). Portanto, para obter a luz solar com a incidência normal, é necessário inclinar os módulos solares para aumentar o seu nível de geração (CAMPOS, ALCANTARA, 2016).

O valor do ângulo de inclinação do módulo é relacionado à latitude do local onde de instalação do módulo. Ele deve ter sua face apontada para o norte, se estiver no hemisfério sul, e para o sul, se estiver no hemisfério norte. Em grande partados locais, a direção do norte ou sul verdadeiro não é igual à do Norte ou sul magnético. Então, são necessárias correções do referencial magnético que podem ser obtidos através de mapas e programas computacionais (CRESESB, 2006). Na Figura 5 é ilustrado o procedimento descrito.

4.3 Temperatura externa

Os módulos fotovoltaicos saem das fabricas com dados de níveis de tensão e corrente obtidos através de ensaios padronizados. Em média, eles são submetidos a uma temperatura de 25° C (no STC) de forma a obter a eficiência máxima do módulo. Esses valores podem ser observados na folha de dados do módulo. Mas na aplicação dos módulos em

sistemas fotovoltaicos alguns fatores podem afetar a produção de energia. Um dos fatores que mais afetam é a temperatura. Na prática, ela pode ultrapassar os 40°C (RIBEIRO; MATOS; ALEXANDRIA, 2016). Michels et al. (2010) concluíram em seu trabalho que a variação da temperatura influencia muito nos valores de tensão e corrente, afetando diretamente a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Então, com o sol em seu ponto máximo de irradiância, a eficiência do painel solar não aumenta, chegando ao fato de que o aumento da temperatura é inversamente proporcional à eficiência dos módulos fotovoltaicos.

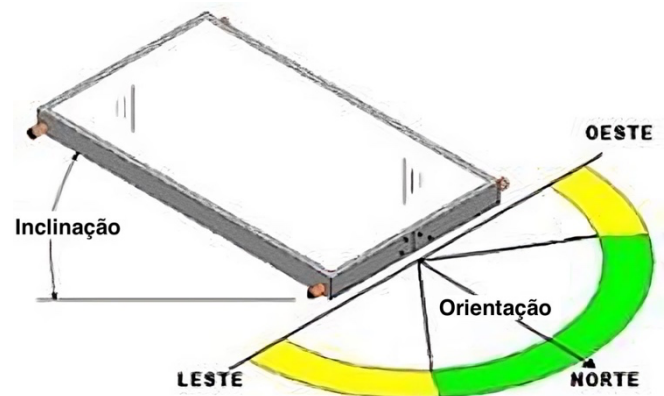


Fig. 5: Ângulos de inclinação do módulo. Fonte: (KISOLTEC, 2019).

5. METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em duas etapas: o desenvolvimento de um protótipo e a coleta de dados através de experimentos práticos.

No protótipo, realizou-se uma simulação do desempenho da movimentação dos espelhos, em escala menor. Foi construída uma maquete de uma casa, em escala livre, com um pequeno módulo fotovoltaico e um sistema com um espelho móvel posicionado no telhado embaixo do módulo, conectado a motores que realizam os movimentos de ejeção e inclinação dele, conforme ilustrado na Figura 6.



Fig. 6: Protótipo do sistema móvel do espelho. Fonte: os próprios autores.

O sistema móvel foi construído de forma a realizar o movimento de ejeção do espelho e sua inclinação de forma a redirecionar a luz do sol para os módulos. O acionamento do sistema foi planejado para ocorrer sempre no período da tarde, após o ângulo de incidência da luz solar ultrapassar 90° em relação ao solo.

Para a validação do sistema, foram realizados experimentos utilizando dois módulos fotovoltaicos, com potência nominal de 345 W, com os parâmetros mostrados na Tabela 2. E um espelho com as mesmas dimensões dos módulos. Nessa proposta, os espelhos devem ser fixados juntos aos módulos inferiores de uma *string*, de forma que o reflexo de cada espelho atinja o maior número de módulos de cada respectiva coluna (arranjo que depende da disposição dos módulos).

Tabela 2. Parâmetros elétricos dos módulos.

Parâmetro	Valor
Potência de pico Watts-Pmax*	345 Wp
Tensão de potência máxima-Vmp	37,7 V
Corrente de potência máxima-Imp	9,15 A
Tensão de circuito aberto-Voc	46,4 ± 3%
Corrente de curto-circuito-Isc	9,62 ± 4%
Eficiência do Módulo η_m	17,0%
STC: Irradiância: 1000 W/m; Temperatura da célula: 25 °C; Massa de ar: 1,5. *Tolerância de medição: ± 2,5%	

Fonte: (Adaptado de THE SPLITMAX, 2019).

Esses experimentos foram realizados nos dias 20 e 25 de maio de 2021, entre 13:30 e 16:00. Eles consistiram na simulação de uma parte do sistema proposto, simulado no protótipo. Primeiramente, foi utilizado apenas um módulo com o espelho posicionado conforme mostrado na Figura 7. O experimento consistiu em coletar dados de geração do módulo sem a utilização do espelho e com sua utilização para fins de comparação dos resultados. Com o uso do espelho, o experimento consistiu no redirecionamento da luz solar sobre o módulo inclinando o espelho, de forma manual, de acordo com a posição do sol, ajustando conforme sua movimentação no céu, ao passo que a temperatura do módulo, a tensão e a corrente eram medidas. Foram obtidos seis pares de medições, cada par com uma medição sem o uso do espelho e outra, com o uso do espelho, com ângulos diferentes de inclinação, entre 87° e 97°, para um módulo, seguindo a posição zenith do sol.

Depois, dois módulos foram conectados em série. Nesse segundo experimento, ambos os módulos estavam sobre projeção natural de sombra gerada pelo muro da edificação local, como mostrado na Figura 8. Como no experimento anterior, foram obtidos seis pares de medições, cada par com uma medição sem o uso do espelho e outra, com o uso do espelho.

Como carga, foram utilizados os enrolamentos de um pequeno transformador associado em série com os enrolamentos do estator de um motor de indução, com uma resistência total de 6,2 Ω , aproximadamente, uma resistência baixa o suficiente para se obter uma corrente na ordem de unidades de ampères.

Assim, com esses dados, foram realizadas análises das diferenças de potências geradas sem e com a utilização do espelho móvel.



Fig. 7: Módulo instalado em um telhado simulado. Fonte: os próprios autores.



Fig. 8: Módulos com sombreamento. Fonte: os próprios autores.

6. RESULTADOS

6.1 Protótipo

Silva e Conceição (2021) apresentam o funcionamento de um protótipo, no qual o espelho fica acomodado embaixo do módulo fotovoltaico. Um motor movimenta a ejeção dele para fora e um servo motor realiza o movimento de inclinação. Foram utilizados feixes de laser para simular os raios solares e demonstrar o redirecionamento deles sobre o módulo. A inclinação do espelho segue o ângulo de zenith do sol. Na Figura 9 é mostrado o sistema de movimento do espelho no protótipo.



Fig. 9: Sistema de inclinação do espelho no protótipo. Fonte: os próprios autores.

6.2 Coleta e validação dos dados

Na Tabela 3 são mostrados os dados obtidos sem o uso do espelho móvel, em que “Âng” é o ângulo de inclinação do espelho, “V”, “I” e “P” são a tensão, a corrente e a potência geradas pelo módulo, respectivamente, “Zen” é a elevação Zenith e “Azi” é o azimute do sol.

Tabela 3. Dados do experimento com um módulo sem o uso do espelho.

Hora	Âng	T (°C)	V (V)	I (A)	P (W)	Zen	Azi
13:52	-	44,7	38,8	5,0	194,0	42,3°	314,0°
14:03	-	48,3	39,3	4,8	187,9	40,1°	311,6°
14:11	-	43,9	40,3	4,9	199,8	39,0°	310,5°
14:15	-	44,4	39,6	4,9	196,4	38,1°	309,6°
14:20	-	50,0	39,0	4,6	179,4	37,3°	308,9°
14:25	-	46,7	39,9	4,9	195,5	36,6°	308,2°

Fonte: os próprios autores.

Já com o uso do espelho para o redirecionamento dos raios solares sobre o módulo, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados do experimento com um módulo com o uso do espelho.

Hora	Âng	T (°C)	V (V)	I (A)	P (W)	Zen	Azi
13:55	87,0°	54,8	39,7	5,4	214,4	41,5°	313,2°
14:05	90,0°	49,3	40,4	5,8	234,3	40,1°	311,6°
14:12	92,0°	44,1	41,0	5,9	241,9	39,0°	310,5°
14:16	93,0°	50,5	40,4	5,7	231,5	37,4°	309,4°
14:21	95,0°	52,3	39,8	5,4	214,9	36,9°	308,6°
14:28	97,0°	48,2	40,6	5,8	235,5	35,8°	307,6°

Fonte: os próprios autores.

Na Tabela 5 são apresentadas as comparações das potências geradas em cada par e o percentual de otimização em relação às potências geradas com o uso do espelho.

Tabela 5. Percentual de otimização sem e com o uso do espelho.

Par	Sem espelho		Com espelho		Otimização (%)
	Hora	P (W)	Hora	P (W)	
1	13:52	194,0	13:55	214,4	10,5
2	14:03	187,9	14:05	234,3	24,7
3	14:11	199,8	14:12	241,9	21,1
4	14:15	196,4	14:16	231,5	17,9
5	14:20	179,4	14:21	214,9	19,8
6	14:25	195,5	14:28	235,5	20,5
			MÉDIA		19,1

Fonte: os próprios autores.

Observa-se, então, que o uso do espelho redirecionando os raios do sol com o ajuste da inclinação desse espelho de acordo com a posição do sol ao longo do período de realização dos experimentos, obteve-se uma otimização média de 19,1% na potência gerada pelo módulo. Por outro lado, a temperatura do módulo sofreu um acréscimo de cerca de 3,5°C em relação ao experimento sem o uso do espelho. No último experimento,

com dois módulos conectados em série e com sombreamento sobre um deles, obteve-se os dados apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Dados do experimento com dois módulos, sombreamento sobre um dele e sem o uso do espelho.

Hora	Âng	T (°C)	V (V)	I (A)	P (W)	Zen.	Az.
14:36	-	46,7	78,8	3,9	303,4	34,4°	306,5°
14:41	-	42,2	78,3	3,5	274,1	33,4°	305,5°

Fonte: os próprios autores.

Tabela 7. Dados do experimento com dois módulos, sombreamento sobre um dele e com o uso do espelho.

Hora	Âng	T (°C)	V (V)	I (A)	P (W)	Zen.	Az.
14:34	97,0°	47,1°	81,2	4,9	397,9	34,0°	306,2°
14:39	98,0°	45,7°	78,1	4,6	359,3	33,9°	305,8°

Fonte: os próprios autores.

Na Tab. 8 são mostrados os percentuais de otimização desse experimento.

Tabela 8. Percentual de otimização sem e com o uso do espelho para dois módulos com sombreamento em um deles.

Par	Sem espelho		Com espelho		Otimização (%)
	Hora	P (W)	Hora	P (W)	
1	14:36	303,4	14:34	397,9	31,2%
2	14:41	274,1	14:39	359,3	31,1%
			MÉDIA		31,1%

Fonte: os próprios autores.

Assim, nesse último experimento, o uso do espelho reduziu o efeito do sombreamento otimizando a potência gerada pelo arranjo em 31,1%. A temperatura dos módulos sofreu um acréscimo de cerca de 2,0%.

7. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho mostram que, de modo geral, a implantação de espelhos móveis em sistemas fotovoltaicos para o direcionamento da luz solar sobre os módulos pode aumentar a potência gerada, otimizando o sistema. Outro ponto de otimização é a redução dos efeitos de sombreamento, uma vez que parte da luz solar pode ser direcionada para a área sem irradiação, elevando a potência gerada por consequência do aumento da incidência de fótons, o que pode ser uma solução em sistemas que sofrem por esses efeitos em locais, por exemplo, com muitas árvores que crescem ao longo do tempo ou com edificações que foram construídas após a instalação do sistema e acabam projetando sombra sobre ele, levando à degradação da potência gerada.

No entanto, ainda são necessários mais estudos, uma vez que os experimentos realizados neste trabalho foram básicos, utilizando apenas dois módulos, um espelho e uma carga resistiva. Como passo seguinte, deve-se aplicar o método proposto em um sistema fotovoltaico real, em operação, e realizar análises dos dados de geração a partir dos inversores, utilizando os dois cenários: com espelho e sem espelho. Ainda há considerações a

serem feitas também sobre os espelhos acoplados nos painéis fotovoltaicos, sendo necessário, por exemplo, fazer um estudo crítico para otimizar o tamanho desses espelhos. O passo seguinte deve ser a realização de um estudo técnico-econômico para a implantação do sistema proposto.

Em suma, os resultados obtidos mostraram que o sistema proposto é plausível em termos de otimização da geração de energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio logístico do Prof. Me. Edeilson Brito Santos, com a cessão do espaço e dos materiais para a realização dos experimentos, ao qual deixamos nosso agradecimento.

Agradecemos também ao Centro Universitário Nobre de Feira de Santana (UNIFAN) por todo o apoio prestado durante o período de realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

- Alves, João Paulo (2010). *Requisitos para a Certificação PV*. 134 p. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Lisboa. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59205/1/000144466.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2021.
- INPE (2017). *Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2. Ed.* 1 p. INPE. São José dos Campos. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html>. Acesso em: 2 abr. 2021.
- Bortoloto, Valter A. et al (2017). 6ª JORNACITEC. *Geração De Energia Solar On Grid E Off Grid*. 6 p. FATEC de Botucatu Botucatu. Disponível em: <<http://jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/VIJTC/VIJTC/paper/viewFile/1069/1234>>. Acesso em: 2 mar. 2021.
- Brito, Miguel C., serra, João M. (2015). *Células solares para a produção de energia eléctrica*. 5 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267721954_Celulas_solares_para_a_producao_de_energia_elctrica>. Acesso em: 10 nov. de 2020.
- Campos, Mayara S., Alcantara, Licinius D. S. (2015). *Interpretação dos Efeitos de Tempo Nublado e Chuvoso Sobre a Radiação Solar em Belém/PA Para Uso em Sistemas Fotovoltaicos*. 10 p. Belém. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v31n4s1/0102-7786-rbmet-31-04-s1-0570.pdf>>. Acesso em: 10 nov. de 2020.
- Canal Solar (2020). *Maior fachada fotovoltaica do mundo é construída no Brasil: Grupo CAO A e Sunew firmam parceria e instalam OPV em prédio da montadora, localizado em Anápolis (SP)*. 1 p. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/maior-fachada-fotovoltaica-adido-mundo-e-construida-no-brasil/>>. Acesso em: 20 maio 2021.
- Castro, Rui (2002). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução à Energia Fotovoltaica*, Lisboa, Portugal, 49. Lisboa. Disponível em: <http://ead2.ctgas.com.br/arquivos/Pos_Tecnico/Especializacao_Energia_Eolica/Medicao_Anemometrica/Material%20de%20Consulta/Livros/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Energia%20E%C3%B3lica.pdf>. Acesso em: 23 out. 2020.
- CRESESB (2006). *Energia Solar: Princípios e Aplicações*. 28 p. Disponível em <engenharias.net.br/wp-content/uploads/2017/06/Cresesb-Energia-Solar-Principios-e-Aplicacoes.pdf>. Acesso em: 10 nov. de 2020.
- CORRÊA, Marco A. (2013). *Otimização de Microdissipadores de Calor para Células Fotovoltaicas com Espelhos ou Lentes Concentradoras: Projeto e Otimização de Dissipadores Térmicos de Microcanais para Células Fotovoltaicas de Alta Concentração*. 73 p. UFRJ. Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9559/1/monopoli10006423.pdf>>. Acesso 12 nov. de 2020.
- Dienstmann, Gustavo (2009). *Energia; Fotovoltaico; Energia elétrica*. Energia solar, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, p. 5-90. disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/24308/000736300.pdf>> Acesso 11 ago. de 2022.
- ECORI Energia Solar. Disponível em <<https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/modulos-fotovoltaicos--monocristalino-ou-policristalino---qual-a-melhor-dessas-duas-tecnologias-para-o-brasil>> Acesso 11 ago. de 2022.
- ENERDATA. World Energy & Climate Statistics: Yearbook 2021. In: Share of renewables in electricity production: Breakdown by country (%). Enerdata, 2021. Disponível em: <<https://yearbook.enerdata.net/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html>>. Acesso em: 11 ago. 2022.
- Feijóo, Guilherme C. (2017). *Fatores que Influenciam a Geração de Energia Solar (Parte 1)*. 1 p. Disponível em: <<https://guilhermefeijoo.medium.com/fatores-que-influenciam-a-gera%C3%A7%C3%A3o-de-energia-solar-fotovoltaica-parte-1-11ae892ae9af>>. Acesso em: 6 abr. 2021.
- Ferronato, Régis, Severo, Tiago C. (2018). 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. *Análise do Rendimento de um Módulo Fotovoltaico com Suporte de Inclinação Variável*. 8 p. UCS. Bento Gonçalves. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=490&ano=_sexto>. Acesso em: 21 abr. 2021.
- Green, Martin et al (2022). *Progress in Photovoltaics. Solar cell efficiency tables (version 59)*. 10 p. Wiley. New Jersey. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pip.3506>>. Acesso em: 07 mai. 2022.

- Guimarães, Ana P. C. (2003). *Estimativa de Parâmetros da Camada Atmosférica para Cálculo da Irradiação Solar Incidente na Superfície Terrestre*. 185p. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/tese/2003_0_1_guimaraes_a_p_c_dr.pdf>. Acesso em: 19 de jun. 2021.
- Junior, Marco T. K. M., Nicoladelli, Gabriel de M. (2019). *Estudo de caso de sistema fotovoltaico off-grid: análise, monitoramento e viabilidade*. Engenharia Elétrica-Tubarão. Disponível em: <<https://riuni.unisul.br/handle/12345/9935>> Acesso em: 9 de jun. 2021.
- Jurinic, Francesco (2020). *Estudo Para Melhoria Na Performance E Eficiência De Placas Fotovoltaicas: Através De Um Sistema Combinado De Inclinação E Resfriamento*. 96 p. UFFS. Chapecó. Disponível em: <<https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/3612>> Acesso em: 29 de mai. 2021.
- Kisoltec (c2017). *Manual de Instalação do Aquecedor Solar*. 1 P. Disponível em <<https://www.kisoltec.com.br/instalacao-aquecedor-solar>> Acesso em: 19 jun. 2021.
- Krause, Marcelo & Amendola, Monica. (2021). Brazilian Journal of Development. *Um estudo sobre a incidência solar e o posicionamento geográfico da cidade de Ilhéus, Bahia, como fator relevante para a instalação de sistemas fotovoltaicos*. 16 p. Disponível em <[https://www.researchgate.net/publication/354368377_ Um_estudo_sobre_a_incidencia_solar_e_o_posicionamento_geografico_da_cidade_de_Ilheus_Bahia_como_fator_relevante_para_a_instalacao_de_sistemas_fotovoltaicos](https://www.researchgate.net/publication/354368377_Um_estudo_sobre_a_incidencia_solar_e_o_posicionamento_geografico_da_cidade_de_Ilheus_Bahia_como_fator_relevante_para_a_instalacao_de_sistemas_fotovoltaicos)> Acesso em 30 ago. 2022.
- Michels, Roger N. et al (2010). *Revista Agrogeoambiental. A Influência da Temperatura na Eficiência de Painéis Fotovoltaicos em Diferentes Níveis de Incidência da Radiação Solar*. 6 p. IF Sul de Minas. Disponível em: <<http://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/288>>. Acesso em: 02 jun.2021.
- Moura, Lucas S. (2017). *Árvores Solares: Um Novo Conceito na Geração de Energia Solar Fotovoltaica*. 57p. UnB-FGA. Brasília. Disponível em: <https://fga.unb.br/articles/0001/9265/TCC1ArvoreSolar_LucasSantosMoura_100034764.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- Nascimento, Cássio A. do (2004). *Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica*. 21 p. UFLA. Lavras. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf>. Acesso em: 23 out. 2020.
- Ribeiro, Indira P., matos, Francisco F. dos S., alexandria, Auzuir R. (2017). *Conexões - Ciência e Tecnologia. Avaliação Computacional da Influência da Temperatura na Potência de um Painel Fotovoltaico*. 5 p. IFCE. Fortaleza. Disponível em: <<http://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/view/1160/861>>. Acesso em: 02 jun. 2021.
- Scherer, Lara A. et al (2015). XX Seminário Interinstitucional de Ensino, Pesquisa e Extensão. *Fonte Alternativa de Energia: Energia Solar*. 12 p. UNICRUZ. Cruz Alta. Disponível em: <<https://home.unicruz.edu.br/seminario/anais/anais-2015/XX%20SEMINARIO%20INTERINSTITUCIONAL%202015%20-%20ANAIS/Graduacao/Graduacao%20-%20Resumo%20Expandido%20-%20Exatas,%20Agrarias%20e%20Ambientais/FONTE%20ALTERNATIVA%20DE%20ENERGIA%20ENERGIA%20SOLAR.pdf>> Acesso em: 24 out. 2020.
- Soares, Raiana S., Tomaszewski, Geórgia A.; Haag, Rafael (2018). VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. *Elaboração de Mapas Solarimétricos para o Estado do Rio Grande do Sul Através do Tratamento e Interpolação de Dados Oriundos de Estações Meteorológicas*. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 9 p. Gramado. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/685>> Acesso em: 19 de jun. 2021.
- Titton, M. G., De Bona, J. C., Bühler, A. J. (2015). XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. *Módulos Fotovoltaicos Ci (G) S: Análise da Tecnologia*. 10 p. Disponível em <https://www.researchgate.net/profile/Alexandre-Buehler/publication/304582119_MODULOS_FOTOVOLTAICOS_CIGS_ANALISE_DA_TECNOLOGIA/links/5774539508aeb9427e242233/MODULOS-FOTOVOLTAICOS-CIGS-ANALISE-DA-TECNOLOGIA.pdf>. Acesso em 06 ago 2021.
- Torres, Rafael G. (2015). *Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação do Potencial de Utilização de Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica em Meios Urbano*. 163 p. UFRS. Porto Alegre. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/140530>>. Acesso em: 16 mar. 2021.
- Vallêra, Antônio M., Brito, Miguel C. (2006). *Meio Século de História Fotovoltaica*. 6 p. CFMC. Lisboa. <<http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>> Acesso em: 10 nov. de 2020.