

# Influência do passo de atuação dos rastreadores solares em um eixo na geração de energia elétrica em módulos fotovoltaicos

Franchi, D.\*. Miotto, M. Da Silva, E. I. Gonzatti, F. Farret, F. A.

Federal University of Santa Maria, Center of Excellence in Energy and Power Systems, Santa Maria, Brazil  
\* e-mail: diogofranchi@gmail.com

**Abstract:** The increasing increase in electric power consumption brings with it the concern about the environmental damage caused to its generation. One solution to minimize this damage is the use of renewable energy sources. Among the cleanest forms of generation and which its use has expanded most is photovoltaics – PV. In order to increase the efficiency of PV generation, several researches have been undertaken on the constructive aspects, as well as aggregate other technologies to PV panels, such as solar tracking to increase the density of incident solar radiation. This paper discusses solar tracking on one axis (East-West) by evaluating the influence of the amplitude of each step of action. Four distinct steps, 2, 5, 10 and 30 degrees were evaluated under the same climatic conditions from August to November of 2019. The results showed that the PV module with the highest actuation step had average generation a 3% lower in comparison to the module with the lowest step, which had the highest generation among the tested steps.

**Resumo:** O crescente aumento do consumo de energia elétrica traz consigo a preocupação com os danos ambientais causados para a sua geração. Uma solução para minimizar estes danos é o uso de fontes de energias renováveis. Entre as formas de gerações mais limpas e que o seu uso mais expandiu foi a fotovoltaica – PV. Para aumentar a eficiência da geração PV tem-se empenhado várias pesquisas nos aspectos construtivos, como também agregado outras tecnologias aos módulos PV, como o rastreamento solar para aumentar a densidade da radiação solar incidente. Este artigo aborda o rastreamento solar em um eixo (Leste-Oeste) avaliando a influência da amplitude de cada passo de atuação. Foram avaliados quatro passos distintos, 2°, 5°, 10° e 30° sob as mesmas condições climáticas ao longo dos meses de agosto a novembro do ano de 2019. Os resultados mostraram que o módulo PV com maior passo de atuação apresentou uma geração média 3% menor em relação ao módulo com menor passo, o qual teve a maior geração entre os passos testados.

**Keywords:** PV module; Solar Tracker; Efficiency; Renewable; Electric Power Generation.

**Palavras-chaves:** Módulo PV; Rastreador Solar; Eficiência; Renovável; Geração de Energia Elétrica.

## 1. INTRODUÇÃO

A eletricidade é uma energia fundamental para as mais variadas aplicações. Entretanto, a forma como é gerada tem preocupado a humanidade com relação aos impactos ambientais. Uma das alternativas atuais para contornar esse problema são as fontes renováveis, como por exemplo, a tecnologia fotovoltaica – PV. Esta tecnologia converte a irradiação do Sol diretamente em energia elétrica com baixíssimos danos ambientais, visto que durante sua operação não há produção de poluentes (CO<sub>2</sub>) (Siecker, Kusakana e Numbi, 2017). O autor ainda cita que quando em operação, os módulos PVs exigem pouca manutenção e baixos custos operacionais em relação a outras tecnologias.

A tecnologia fotovoltaica tem se expandido a níveis extraordinários em todo o mundo. Segundo EREC (2010), de 2005 a 2010, o mercado mundial de módulos fotovoltaicos cresceu acima de 30% ao ano, focado em aumentar a eficiência energética e a redução de matéria-prima, ao mesmo tempo em que ocorreu uma queda considerável nos seus preços. Uma projeção realizada pela IEA (2019a) indica que em 2030 a geração de energia

elétrica fotovoltaica pode chegar a 3.268 TWh, aproximadamente 5,6 vezes superior à geração histórica de 2018 (585 TWh). Nesta crescente ascensão do uso da tecnologia PV, intensificam-se as pesquisas voltadas para potencializar a eficiência da geração de energia elétrica dos PVs, tanto em aspectos construtivos quanto na manipulação de suas condições de operação (temperatura, concentração solar, sombreamento, dentre outras).

Diversos campos de estudos da tecnologia fotovoltaica estão concentrados em agregar novas tecnologias para aumentar a produção de energia elétrica. Alguns destes estudos utilizam o rastreamento solar em um e/ou dois eixos (Katrandzhiev e Karnobatev, 2019; Mustafa et al., 2018), a busca de ângulos ótimos de inclinações (Roxana et al., 2018; Oprea et al., 2019), o arrefecimento dos módulos PVs (Croitoru e Craciunescu, 2013), os concentradores solares (Plachta, 2017; Rana; Kumar; Gupta, 2018), os pares termoeletrônicos para a refrigeração dos módulos PVs (Attivissimo et al., 2015), sistemas flutuantes (Cazzaniga et al., 2012), aproveitamento de áreas físicas ociosas, como fachadas de prédios, telhados e lagos (Weiss et al., 2018), entre outros.

Este artigo propõe uma abordagem experimental para o rastreamento solar em um eixo (sentido Leste-Oeste). Sob as mesmas condições, quatro estruturas com movimentações independentes foram submetidas à passos de rastreamento distintos. Assim, os valores resultantes da geração de energia elétrica e o seu consumo energético para mover a estrutura em cada situação são confrontados em busca da otimização do passo de rastreamento.

Inicialmente, este artigo faz uma rápida abordagem sobre a tecnologia fotovoltaica, seguida pela apresentação da Central Experimental Fotovoltaica – CEF que foi utilizada para os ensaios práticos. Na sequência, apresentam-se a metodologia utilizada para a realização do rastreamento solar, os testes e resultados experimentais.

## 2. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

As células fotovoltaicas geralmente são fabricadas a partir de filmes finos ou bolachas (*wafers*) de materiais semicondutores, sendo o silício cristalino o mais utilizado, representando mais de 97% da produção total atualmente (IEA, 2019b), devido a sua abundante disponibilidade na crosta terrestre (MME e EPE, 2007). Ao dopar o silício, ele assume características de “junção pn” que ao ser exposta aos fótons de radiação solar criam pares de lacunas e elétrons. Como resultado disto, a “junção pn” cria um campo elétrico diferente de zero, que por si começa a acelerar as cargas gerando uma corrente elétrica contínua (CC) através destes materiais, originando uma diferença de potencial conhecida como efeito fotovoltaico (EPE, 2016), conforme a Fig. 1.

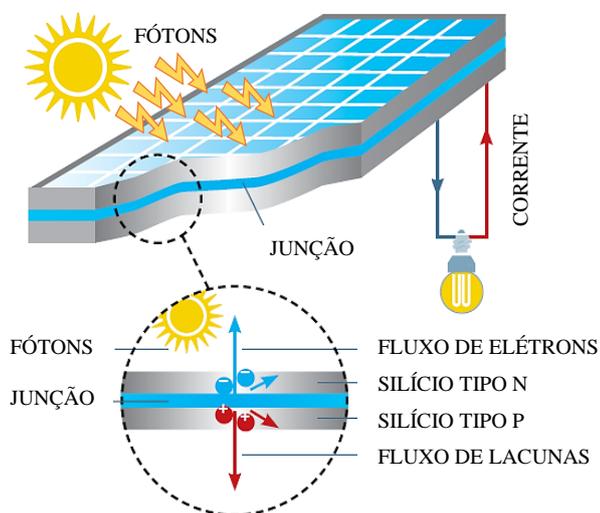


Fig. 1. Efeito PV. Fonte: adaptado de GWEC (2013, p.25).

A eficiência da conversão varia de 11 a 46% (NREL, 2019) conforme as variáveis envolvidas, como a tecnologia de fabricação, a forma de exposição do módulo ao Sol, o design da placa, os materiais empregados na célula PV, a temperatura de operação, etc. (Farret e Simões, 2018). Já a eficiência dos módulos PVs comumente comercializados estão na faixa de 18 a 30%, como os de silício monocristalino (20 a 24%), policristalino (18 a 20%), e filmes finos (25 a 30%) (IEA, 2019b).

### 2.1 Tecnologia para rastreamento solar fotovoltaico

Por demandar um menor investimento inicial, o emprego de módulos PVs em residências e indústrias é majoritariamente difundido em ângulos fixos, cujos valores correspondem as latitudes locais (Bahrami, Okoye e Atikol, 2017; Hafez, Yousef e Harag, 2018) ou mesmo a inclinação do próprio telhado. Além disso, os mecanismos de movimentação acarretam em maiores rotinas de manutenções e custos energéticos para mover a estrutura. Porém, como o rastreador solar garante a incidência perpendicular da componente direta da radiação solar no módulo PV, ele propicia constantemente uma maior potência de saída das células fotovoltaicas (Barsoum e Vasant, 2010).

Os rastreadores solares possuem diversas variantes em suas aplicações, como os mecanismos de movimentação, metodologia para determinar a posição do Sol, arranjo dos PVs, ângulos máximos e mínimos, etc. De modo genérico, o aumento no rendimento de um módulo fotovoltaico rastreado em um eixo em relação ao fixo, idealmente inclinado, pode chegar a 40% (Ghassoul, 2018).

## 3. CENTRAL EXPERIMENTAL FOTOVOLTAICA

Para maximizar a geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos aparte de seus aspectos construtivos, o Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência – CEESP da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, em uma parceria com a Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEEE-GT desenvolveu uma Central Experimental Fotovoltaica. Esta central, dedica-se à realização de testes e pesquisas com a inserção de novas tecnologias junto ao PV convencional.

A central é composta por 48 módulos fotovoltaicos, modelo CS6P-255P da CanadianSolar (2013), totalizando 12,24 kW<sub>P</sub>, com 4 estruturas individuais e 6 pares de arranjos tecnológicos distintos em cada uma. Como cada par de módulos tem um diferente ponto de operação em relação aos demais necessitou-se usar microinversores, modelo MI-500 da Hoymiles (2018), para realizar o rastreamento do ponto de máxima potência – MPPT individual de cada módulo e adequar os níveis de tensão e frequência aos da rede de distribuição.

Entre as tecnologias empregadas na CEF, duas delas são os concentradores solares com espelhos planos e o arrefecimento dos módulos PV com condicionamento via circulação de água geotérmica ou caixa d'água (aquecimento). Outra tecnologia agregada na CEF é o rastreamento solar. O rastreamento do Sol no sentido Leste-Oeste, Eixo 1, está automatizado em todas as 4 estruturas para atuações independentes em cada uma delas. O rastreamento no sentido Norte-Sul, Eixo 2, é automático e igual para todos os PVs de uma única estrutura, similar a ilustração da Fig. 2, enquanto que nas demais os ajustes são manuais para cada par de módulos através de barras roscadas.

A movimentação do Eixo 1, foco deste artigo, é feita por um conjunto motorreductor, cujos dados técnicos estão listados na Tabela 1. Uma correia de transmissão une o motorreductor

à engrenagem fixa no eixo central, numa relação 3,174:1, resultando na relação total de 38884:1 ou 108 voltas/grau. Os limites de atuação estão entre  $-53^\circ$  e  $56^\circ$ , decorrente das limitações mecânicas que a estrutura impõe (haste cor rosa na Fig. 2). Em caso de falha adversa ou operação externa inadequada, todas as estruturas possuem relés de fim-de-curso para garantir a integridade física dos dispositivos

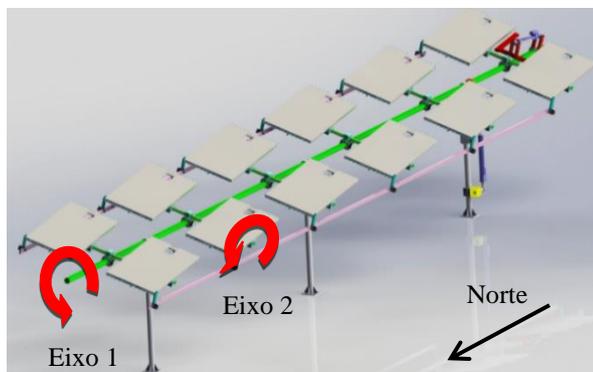


Fig. 2. Mecanismo para rastreamento dos módulos PVs em dois eixos. Fonte: Adaptado de Kuhn et al. (2017).

Tabela 1. Dados técnicos do conjunto motorreductor.

Motorreductor		Motor trifásico	
Tamanho	56	Tensão (V)	220/380-440
Rendimento (%)	89	Moto-reio (V)	220
Redução Exata	12251:1	Potência (W)	120
Torque Nominal (N·m)	820	Número de polos	4

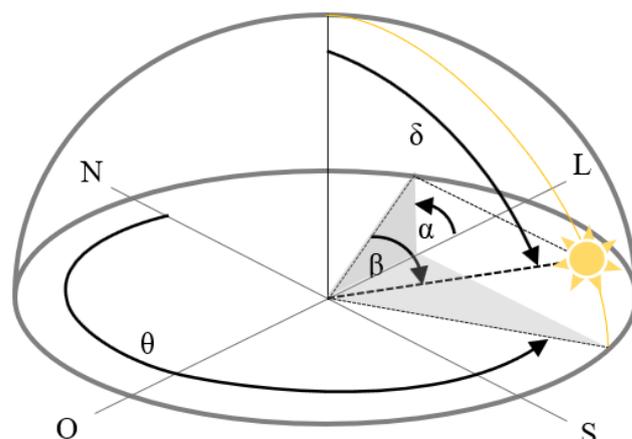
A atuação e o monitoramento das grandezas físicas são comandados e condicionados por uma central com banco de dados e um sistema supervisor via barramento RS-485 e protocolo MODBUS-RTU, interconectando todos os dispositivos da CEF. Por exemplo, cada par de módulos possui um microcontrolador local e placas individuais para as medições das grandezas elétricas, tornando CEF modular, de rápida troca/manutenção, e mais robusta quanto às falhas que poderiam ser globais, limitando-as à local.

#### 4. METODOLOGIA USADA PARA O RASTREAMENTO SOLAR

Há diversos métodos para determinar a posição do Sol a cada instante. Entre as metodologias de rastreamento ativo destacam-se o uso de sensores LDRs, células fotovoltaicas auxiliares e os métodos de data e hora (Miotto, 2019). Neste artigo empregou-se a última metodologia, pois ela permite determinar a posição do Sol em relação a um ponto na Terra com um conjunto de equações desenvolvidas pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA) dos Estados Unidos, a partir da data, horário e posições globais: latitude e longitude (NOAA, 2010). Como resultado, obtêm-se os valores dos ângulos de azimute e zênite do Sol para qualquer horário, dia e ano.

A movimentação dos módulos PVs da CEF foi desenvolvida para o deslocamento físico rotacional de dois

eixos, um no sentido Norte-Sul (Eixo 2) e outro no sentido Leste-Oeste (Eixo 1). Este método de movimentação implementado na CEF possui referências diferentes às fornecidas pelo algoritmo de NOAA (2010), Fig. 3. Miotto (2019) desenvolveu a relação entre estes ângulos, resultando em (1) e (2).



$$\text{Zênite} = \delta \quad \text{Azimute} = \theta \quad \text{Eixo 1} = \alpha - 90^\circ \quad \text{Eixo 2} = \beta$$

Fig. 3. Conversão dos ângulos de Zênite e Azimute em Eixos 1 e 2.

$$\text{Eixo 1} = \tan^{-1}[\sin(-\text{Azimute})/\tan(90^\circ - \text{Zênite})] \quad (1)$$

$$\text{Eixo 2} = \sin^{-1}[\cos(90^\circ - \text{Zênite}) \times \cos(-\text{Azimute})] \quad (2)$$

A central calcula a posição do Sol (referência), e usa como realimentação da posição os acelerômetros (MPU9250). Estes dispositivos fornecem a aceleração da gravidade em três eixos ortogonais, porém, como o sensor está fixo o eixo de cor verde da Fig. 2, a sua leitura somente apresenta variações da aceleração da gravidade em dois dos três eixos.

O controle do motor de atuação é realizado por um inversor de frequência, modelo ATV312H075M2 da Schneider Electric. A central calcula e envia ao inversor de frequência o número de voltas que o motor deve percorrer para alcançar a nova posição pela diferença entre a posição do Sol e a posição atual da estrutura. Para que não ocorram solavancos e movimentos abruptos na partida ou na parada das movimentações das estruturas, são utilizadas as funções de rampas do inversor de frequência. Essas funções possibilitam acelerações e desacelerações suaves e progressivas em uma faixa de tempo pré-definida. O consumo energético nos testes de movimentação não apresentou diferenças expressivas ao utilizar diferentes passos de atuação. A energia consumida para o rastreo do Sol considerando todo o sistema de movimentação é de 0,16 Wh/grau, ou 17,5 Wh/dia para o percurso completo.

A escolha do estudo desta movimentação específica deve-se ao seu maior emprego em relação a movimentação em dois eixos. Portanto, neste artigo analisa-se a influência na geração quantitativa de energia elétrica dos módulos PVs pela discretização maior ou menor dos passos do rastreador solar em um eixo (Eixo 1). Para tal, foram estabelecidos quatro passos distintos, listados na Tabela 2.

Tabela 2. Discretização dos passos de rastreamento.

Estrutura	Passos	Erro para atuação	Média de atuações	Erro de posição	Ângulo Eixo 2
A	5°	2,5°	22	± 1°	30°
B	2°	1°	55	± 1°	30°
C	10°	5°	11	± 1°	30°
D	30°	15°	5	± 1°	30°

De acordo com a Tabela 2, as estruturas que sustentam os módulos devem atuar o valor completo dos passos quando a diferença entre o ângulo do Sol e a posição da estrutura, referentes ao Eixo 1, for maior ou igual a metade do valor dos passos, ditos “erro para atuação”. Com esta metodologia, ao invés da estrutura rastrear o Sol em sua posição atual, baseada na trajetória do Sol ela passa a posicionar-se a frente (metade do valor dos passos). Com isto, otimiza-se o número de atuações do movimentador, uma vez que ao posicionar-se precisamente à posição do Sol, nos próximos instantes o posicionamento já estará defasado, requerendo um reposicionamento a todo momento. Além disso, dada a posição que os módulos devem assumir, admitem-se erros de posicionamento entre ± 1°, com ângulo do Eixo 2 fixo em 30° em todas as estruturas por estar próximo ao valor da latitude local (29,724193 Sul), adotado por apresentar desempenho próximo ao ideal para este tipo de rastreamento (Bahrami, Okoye e Atikol, 2017).

### 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O gráfico da Fig. 4 corresponde à uma parcela do percurso total em que cada módulo rastreou o Sol no dia 06 de novembro de 2019, conforme a Tabela 2. No gráfico da Fig. 5 são detalhados os passos com menor e maior amplitude, e no gráfico da Fig. 6 os valores de suas potências individuais. Na Tabela 3 resumem-se os principais dados deste dia de teste, assim como na Tabela 4.

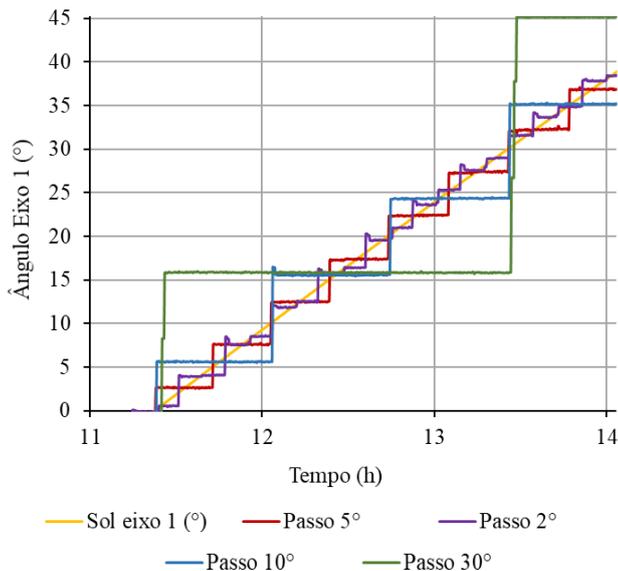


Fig. 4. Rastreamento solar com diferentes passos, no dia 06 de novembro de 2019.

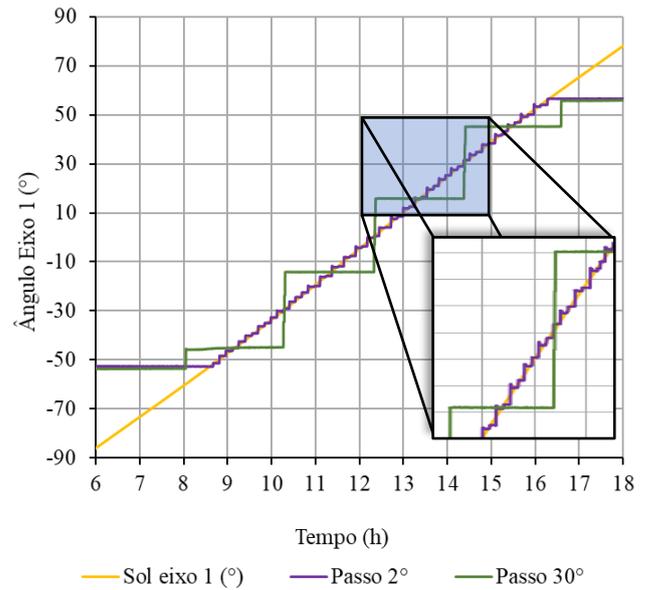


Fig. 5. Rastreamento solar com passos de 2° e 30° no dia 06 de novembro de 2019.

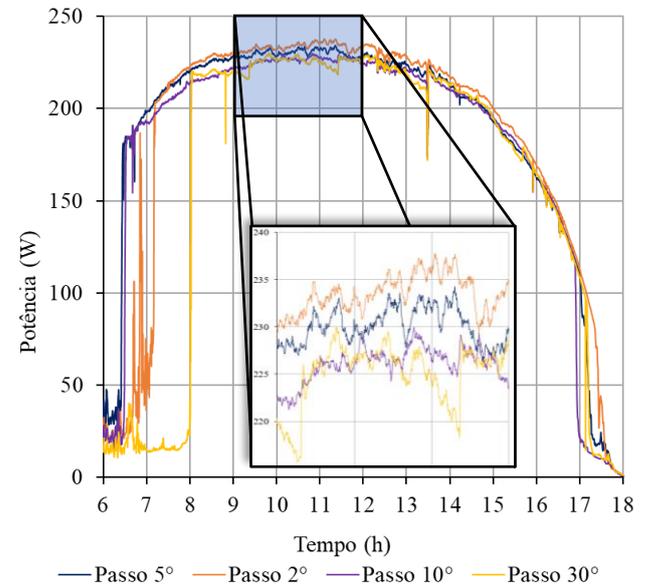


Fig. 6. Potência gerada no dia 06 de novembro de 2019.

Salienta-se que na CEF há uma quantidade expressiva de árvores que causam sombreamento nos módulos PVs no início da manhã e no final da tarde. Portanto, na Fig. 6, a “Estrutura D”, na cor amarela, está sombreada até as 8 horas e a “Estrutura C”, na cor roxa, começa a ser sombreada a partir das 16h45min.

Tabela 3. Dados energéticos do experimento no dia 06 de novembro de 2019.

Estrutura	Potência Máxima	Potência Média	Energia	Energia relativa ao maior
A	234 W	210 W	1846 Wh	97,9%
B	238 W	214 W	1884 Wh	100%
C	230 W	208 W	1824 Wh	96,8%
D	230 W	207 W	1820 Wh	96,6%

Tabela 4. Dados energéticos ao longo de quatro meses do ano de 2019.

Estrutura	21/08	28/08	06/09	13/09	04/10	09/10	16/10	23/10	02/11	06/11	13/11	20/11	Total	Total relativo ao maior
A (Wh)	1553	1440	273	695	464	1709	290	1790	418	1843	341	1612	12428	98,6%
B (Wh)	1563	1452	284	726	479	1730	297	1799	425	1880	348	1616	12599	100%
C (Wh)	1506	1412	276	690	479	1710	298	1796	430	1821	353	1605	12376	98,2%
D (Wh)	1503	1370	275	679	465	1694	282	1785	412	1817	340	1599	12221	97%

Por conta destes sombreamentos, os valores reunidos na Tabela 3 consideram o período em que nenhum módulo é sombreado pelas árvores, afim de garantir condições iguais durante os testes. Na Tabela 4 adota-se o mesmo princípio, onde cada dia de teste detém um período estimado diferente dos demais, segundo os sombreamentos.

Na Tabela 3 observa-se que não há variação considerável na geração de energia elétrica dos módulos PVs com passos distintos. Da mesma forma, na Tabela 4 apresentam-se os dados de testes experimentais ao longo de quatro meses do ano de 2019. No período dos quatro meses de testes, verificou-se que o passo de menor amplitude apresentou a maior geração. As exceções foram nos dias nublados ou chuvosos, quando a geração de energia elétrica de todos os módulos fora menor em relação aos dias de céu claro. Nestes dias nublados, a radiação direta é reduzida consideravelmente, predominando as radiações indiretas, como a difusa e refletida, justificando os desencontros dos padrões médios.

Uma diferença de 3% na geração de energia elétrica entre a estrutura com passo de 2° e a estrutura com passo de 30° foi constatado nos testes resumidos na Tabela 4, sem considerar o gasto energético diário para suas movimentações, visto que é o mesmo para todos os passos de atuações. Como se exige uma tecnologia mais apurada, o rastreamento com menor passo pode não se justificar pelo ganho energético obtido. Isto porque ele necessita de sensores e atuadores mais precisos que geram maiores custos, e também de movimentações mais frequentes que acarretam diretamente em maior desgaste mecânico dos componentes.

## 6. CONCLUSÕES

Neste estudo analisou-se a influência dos passos de movimentação do rastreador solar, na direção Leste-Oeste, na geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos. Utilizaram-se quatro passos distintos, 2°, 5°, 10° e 30°. Como cada estrutura possui movimentação independente das demais, aplicou-se um passo em cada uma das estruturas, concomitantemente. Durante os experimentos, todos os módulos foram expostos às mesmas inclinações no Eixo 2, condições climáticas, e para análises dos resultados desconsideraram-se os períodos em que os módulos estavam sombreamentos.

No período dos quatro meses de testes, verificou-se que o rastreamento com o passo de menor amplitude apresentou o melhor desempenho, por conta disso, ele foi tomado como referência. Portanto, o passo de 30° foi o que apresentou o

pior desempenho, gerou 3% a menos que o passo de 2°. Isto indica que não há uma diferença expressiva na geração de energia elétrica entre os diferentes passos testados. Desta forma, o uso de tecnologias mais simples de rastreamento pode se justificar em outros sistemas com módulos fotovoltaicos pela pequena diferença no ganho energético entre o rastreamento mais e menos preciso. Como não constatou-se um consumo energético discrepante para o rastreamento com os diferentes passos de atuação para a CEF deste artigo, aproximadamente, 0,16 Wh/grau, a aplicação do passo de 2° se justifica por proporcionar um ganho de geração de 3%.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro da CPFL Energia Power Utility no projeto “Soluções Inovadoras de Eficiência Energética e Minigeração em Instituição Pública Federal de Ensino Superior: Uma abordagem na UFSM” (P&D/ANEEL), da CEEE-GT, da UFSM, e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- Attivissimo, F. et al. Feasibility of a photovoltaic-thermoelectric generator: Performance analysis and simulation results. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 64, n. 5, p. 1158–1169, 2015.
- Bahrami, A.; Okoye, C. O.; Atikol, U. Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries. *Renewable Energy*, v. 113, p. 563–579, 2017.
- Barsoum, N.; Vasant, P. Simplified Solar Tracking Prototype. *Global Journal on Technology & Optimization*, v. 1, n. June, p. 8, 2010.
- Canadiansolar. Datasheet CS6P. . 2013, p. 2.
- Cazzaniga, R. et al. Floating tracking cooling concentrating (FTCC) systems. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, n. June, p. 514–519, 2012.
- Croitoru, A. M.; Craciunescu, A. Air cooling of photovoltaic panels from passive house located inside the Polytechnic University of Bucharest. *4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, ISEEE 2013 - Proceedings*, n. 9, p. 1–5, 2013.
- EPE. *Energia Renovável - Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. p.452, v. 53, 2016.

- EREC. [R] Evolução energética. A caminho do desenvolvimento limpo. p. 40, 2010.
- Farret, F. A.; Simões, M. G. *Integration of Renewable Sources of Energy*. Second Edi ed. New York: EUA: John Wiley and Sons, 2018.
- Ghassoul, M. Single axis automatic tracking system based on PILOT scheme to control the solar panel to optimize solar energy extraction. *Energy Reports*, v. 4, p. 520-527, November 2018.
- GWEC. [R]Evolução energética - a caminho do desenvolvimento limpo. 2013.
- Hafez, A. Z.; Yousef, A. M.; Harag, N. M. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, n. June 2017, p. 754–782, 2018.
- Hoymiles. Micro Inversor 500W MI-500. Disponível em: <<http://www.hoymiles.com.br/500W-Solar-PV-Microinverter.php>>. Acesso em: 14 nov. 2019.
- IEA. Renewables, 2019a. Disponível em: <<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>>. Acesso em: 6 fev. de 2020.
- IEA. *Photovoltaic Power Systems Programme - PVPS: trends in photovoltaic applications 2019*, 2019b.
- Katrandzhiev, N.; Karnobatev, N. Influence of the angle of fall of light on the photovoltaic panel and its optimization - literature review. *2019 Second Balkan Junior Conference on Lighting (Balkan Light Junior)*, p. 1–5, 2019.
- Kuhn, V. N. et al. Hybrid motor driver for solar tracking systems. *2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2016*. Santa Maria, 2017
- Miotto, M. Monitoramento e acionamento remoto da movimentação e arrefecimento de painéis fotovoltaicos para maximização da potência e eficiência, p. 171, 2019. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- MME; EPE. Plano Nacional de Energia 2030, p. 226, 2007.
- Mustafa, F. I. et al. Simple design and implementation of solar tracking system two axis with four sensors for Baghdad city. *2018 9th International Renewable Energy Congress, IREC 2018*, n. Irec, p. 1–5, 2018.
- NOAA. *General Solar Position Calculations*, 2010. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/solareqns.PDF>>. Acesso em: 14 nov. 2019.
- NREL. Best research-cell efficiencies, 2019. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiency-chart.20190103.pdf>. Acesso em: 21 de fev. 2020.
- Oprea, R. et al. Determination of Optimum Tilt Angle for Fixed Photovoltaic Modules in Iasi, Romania. *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, n. 1, p. 1–6, 2019.
- Plachta, K. Photovoltaic system equipped with a solar concentrator and two-axis tracking system. *Conference Proceedings - 2017 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2017*, p. 1–5, 2017.
- Rana, D.; Kumar, G.; Gupta, A. R. Increasing the Output Power and Efficiency of Solar Panel by Using Concentrator Photovoltaic (CPV) and Low Cost Solar Tracker. *International Conference on &quot;Computational Intelligence and Communication Technology&quot;*, CICT 2018, n. Cict, p. 1–5, 2018.
- Roxana, O. et al. Experimental Evaluation of the Optimum Tilt Angle for Fixed Photovoltaic Modules. *EPE 2018 - Proceedings of the 2018 10th International Conference and Expositions on Electrical And Power Engineering*, p. 594–598, 2018.
- Siecker, J.; Kusakana, K.; Numbi, B. P. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, 2017.
- Weiss, I. et al. PVSITES: Supporting large-scale market uptake of Building-Integrated Photovoltaic technologies. *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, WCPEC 2018 - A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC and 34th EU PVSEC*, n. 1, p. 650–653, 2018.