

# Ensaios laboratoriais para a comparação entre a irradiação solar captada por painéis fotovoltaicos fixos e móveis



ISSN 1870-9095

Maciel, Diogo R.<sup>1</sup>; Souza, Teófilo M.<sup>1</sup>; Boulomytis, Vassiliki T. G.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Avenida Doutor Ariberto Pereira da Cunha 333, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil.

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP Campus Caraguatatuba, Avenida Bahia 1739, Caraguatatuba, São Paulo, Brasil.

E-mail: vassiliki@ifsp.edu.br

(Recibido el 16 de julio de 2021, aceptado el 22 de diciembre de 2021)

## Resumo

Para a captação de energia solar, os painéis fotovoltaicos são normalmente instalados em estruturas fixas, com a parte frontal virada para o norte, onde há maior incidência de radiação solar. No presente trabalho, verificou-se experimentalmente o potencial de captação de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos automatizados, com a possibilidade do posicionamento do painel variar em função da intensidade de radiação solar. Apesar da matriz energética brasileira utilizar, prioritariamente, a energia proveniente de usinas hidrelétricas, devido ao impacto da crise hídrica, tem ocorrido o aumento do uso de painéis fotovoltaicos como fonte de energia. Dessa forma, é essencial avaliar a eficiência do processo de captação de radiação solar. Tal eficiência garante melhor custo benefício para aplicar tecnologias limpas, colaborando com o desenvolvimento do país e com a sustentabilidade global.

**Palavras-chave:** energia renovável, irradiação solar, painel fotovoltaico.

## Abstract

Photovoltaic panels are usually placed on fixed structures to capture solar energy, facing the north direction, where there is a higher incidence of solar radiation. In the present work, the potential for capturing solar energy through automated photovoltaic panels was carried out experimentally, with the possibility of the panel position varying according to the solar radiation intensity. Although the Brazilian energy matrix primarily uses energy from hydroelectric plants, due to the impact of the water crisis, there has been an increase in the use of photovoltaic panels as a source of energy. Thus, it is essential to evaluate the efficiency of the solar radiation capture process. Such efficiency ensures a better cost-benefit to apply clean technologies, collaborating with the country's development and global sustainability.

**Keywords:** renewable energy, solar radiation, photovoltaic panel.

## I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das nações está intimamente ligado à capacidade de captação, beneficiamento e disponibilidade das fontes energéticas aos consumidores. Desde a pré-história o ser humano tenta adequar as energias à sua comodidade. Nos tempos modernos, a crescente evolução tecnológica mostra a necessidade de constante evolução no provimento de energia [1], porém há grande preocupação com a queima de combustíveis fósseis e impactos ambientais. Deste modo, sistemas de energia mais eficientes e sustentáveis vem sendo desenvolvidos para ampliar a oferta de energia renovável [2], entre eles o sistema fotovoltaico. No entanto, o uso do sistema fotovoltaico ainda é limitado devido ao elevado custo de implantação. Uma forma de reduzir esse custo baseia-se na utilização de sistemas com um menor número de células, operando de forma otimizada para atender a demanda

prevista no projeto [3, 4, 5]. Por isso, a eficiência do aproveitamento energético vem sendo amplamente estudada na última década [6, 7, 8]

O objetivo desse estudo foi de verificar a melhor forma de aproveitamento energético entre dois sistemas fotovoltaicos, sendo os painéis solares fixo (i.e. estático) e móvel. A verificação será baseada no maior tempo possível e na melhor posição para captação de energia solar. No painel móvel, a automatização do sistema faz com que os painéis fotovoltaicos movimentem-se automaticamente, acompanhando o movimento do Sol durante o seu período de radiação no sistema [9].

O propósito do estudo foi verificar, por meio de três tipos de células de carga, sendo cada uma constituída por um conjunto de lâmpadas variadas, a irradiação sobre os painéis e a potência disponibilizada a partir dessa irradiação, tanto para o sistema fixo como para o sistema móvel. Como resultado, o painel móvel garantiu o ganho entre 10 e 20 %, justificando a importância da

automatização do sistema, para garantir o melhor aproveitamento de irradiação solar ao longo do dia.

## II. REFERENCIAL TEÓRICO

O Brasil é um país que dispõe de iluminação solar abundante, de forma que a utilização de energia solar pode ser uma alternativa viável, limpa e econômica. Nesse contexto, sistemas projetados para captação e conversão de energia solar têm sido foco de grande interesse na área de Engenharia.

Os maiores desafios para a geração de energia solar são o rendimento e o custo de produção. O rendimento chega no máximo a 12% com silício monocristalino. Já a produção das células fotovoltaicas, mesmo desenvolvidas com um material abundante como o silício, necessita de tecnologia onerosa para a sua geração.

Existem três tipos diferentes de células fotovoltaicas: células de silício monocristalino, policristalino e amorfo. As diferenças são baseadas no rendimento e custo, de forma que o material mais puro (i.e. silício monocristalino), apresenta maiores rendimento e custo quando comparado com o material menos puro, que é o silício amorfo.

Entre as diversas tecnologias para otimização do sistema fotovoltaico, é possível destacar o sistema de rastreamento solar. Esse sistema tem o objetivo de gerar energia de acordo com o movimento do sol e aprimorar o aproveitamento da luz solar quando comparado a um sistema estático. Essa tecnologia pode promover o aumento de 30% a 40% na produção de energia [10].

As tecnologias do sistema de rastreamento podem ser classificadas inicialmente em quatro modos: quanto à quantidade de eixos rotativos, à estratégia de rastreamento, ao tipo de estrutura realizada e ao tipo de controle [10]. Em relação ao número de eixos, podem apresentar eixos simples ou duplos, sendo o simples aquele que acompanha o sol apenas de leste para oeste, enquanto o eixo duplo acompanha o movimento solar de leste para oeste e a posição relativa do sol no céu.

A classificação dos sistemas quanto à estratégia de rastreamento, conforme descrito por [10,11], depende do número de eixos existentes no painel. Sistemas com um eixo podem ter rastreamento polar, azimutal e horizontal, enquanto sistemas de dois eixos realizam rastreamento polar-equatorial e azimutal/elevação. Quanto à estrutura, as tecnologias de rastreamento podem ser classificadas em três subtipos: estrutura em pedestal, na qual o próprio eixo gira para movimentar o painel; estrutura giratória, na qual a base movimenta-se de forma circular no eixo horizontal; e, a *rolltilt*, na qual um conjunto de painéis é movimentado na direção Norte-Sul e ainda há a movimentação de cada painel na direção Leste-Oeste [11]. O objetivo das estratégias descritas é potencializar o sistema com relação à exposição ao sol durante um intervalo de tempo maior e na melhor posição possível de forma a garantir a

otimização da estrutura em relação ao sol. A implementação da automatização desses sistemas possibilita que a estrutura móvel se movimente automaticamente acompanhando o movimento do sol durante o seu período de disponibilidade [9].

Para o controle do movimento, os sistemas podem ter rastreadores passivos, com controle eletro-óptico e microprocessado. Tanto o eletro-óptico como o microprocessado são considerados controles ativos. Sistemas com controle eletro-óptico apresentam sensores óticos em combinação com as células fotovoltaicas fazendo com que um motor DC (de corrente contínua, da sigla do inglês, *direct current*) movimente o sistema. Os sistemas com controle microprocessado possuem um algoritmo matemático e uma programação para prever a movimentação do sol. Este também apresenta um motor DC para a movimentação do sistema e garante alta precisão [12].

O sistema com controle passivo se movimenta em função da utilização de radiação do sol do painel, ou seja, sem uma fonte externa de energia. Para o controle passivo, geralmente é utilizado um sistema de cilindros e pistões na estrutura para promover a movimentação do sistema [12]. Devido ao fato de existirem inúmeras formas de montar um sistema de captação de energia solar, estudos no mundo inteiro procuram prever quais as formas mais eficientes de estruturar esses sistemas. Nesse sentido, [13] realizaram a comparação entre sistemas de um e dois eixos, enquanto [14] descreveu a utilização de um Arduino® e fotodiodos para projetar um rastreador solar. De acordo com a Lei de Wien, o produto entre a temperatura absoluta de um corpo e o comprimento de onda de máxima emissão energética é uma constante, ou seja, quanto menor for a temperatura, maior será o comprimento da onda.

A distribuição da irradiação solar na superfície terrestre é obtida através da zênite, que é a linha perpendicular formada com relação ao plano em que o raio é projetado e o ângulo que se forma entre os raios solares. Esse ângulo é chamado de zenital (Figura 1).

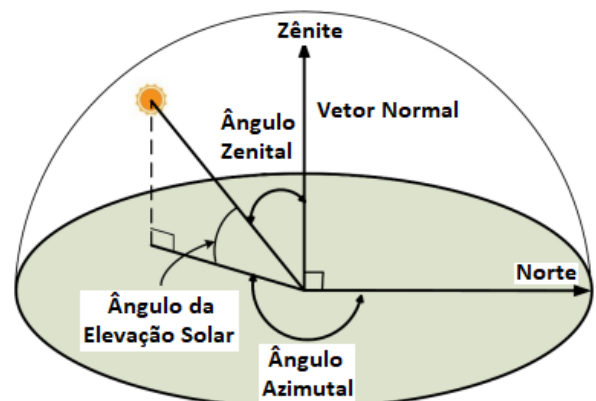


Figura 1. Ângulo Zenital da distribuição da irradiação solar na Terra. Fonte: Adaptada de Cheng *et al.* [15].

O fluxo de potência é mais conhecido como irradiação solar, mas o termo técnico é irradiância solar, que é a energia medida por unidade de área. O ângulo zenital solar depende da latitude, do ângulo de declinação e do deslocamento angular do sol devido à rotação da Terra [15].

O estudo do aumento da capacidade de captação dos raios solares, ou seja, da incidência desses raios sobre o plano em estudo está diretamente ligado à localização dos painéis. Isso porque, a localização, o período do ano, a disponibilidade e a intensidade dos irradiancia podem variar, devido ao giro da Terra em torno do Sol. As coordenadas horizontais solares, o ângulo de incidência e o ângulo zenital vão estar sujeitos a essas variações. Com a movimentação da estrutura no eixo horizontal, tem-se um melhor aproveitamento na captação dos raios solares, devido à diminuição do ângulo zenital. Quanto mais perpendicularidade existir entre os raios solares e as placas fotovoltaicas, melhor será a absorvância e a eficiência para geração de energia pelo sistema [15].

### III. ROTEIRO EXPERIMENTAL

O experimento ocorreu na área externa do Laboratório do Centro de Energias Renováveis da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Guaratinguetá, São Paulo, Brasil (Figura 2).

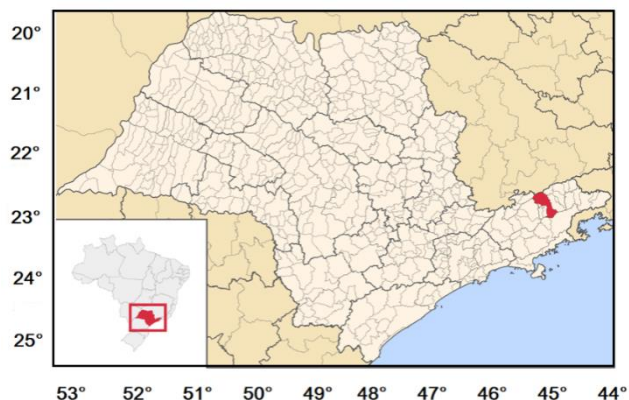


Figura 2. Localização da área de estudo na UNESP, Campus Guaratinguetá, SP, Brasil.

Foi utilizada uma estrutura metálica, com graus de liberdade que representam o número de movimentos horizontais, ou seja, movimentos paralelos ao solo (Figura 3). Foram instaladas quatro placas fotovoltaicas, fixadas na estrutura com inclinação de 35° em relação ao solo e área de captação de 3,510 m<sup>2</sup> (cada placa com a dimensão de 1,350 m x 0,650 m). A especificação de cada placa, fornecida pelo fabricante, pode ser observada na Tabela 1. O desenho esquemático do sistema com instalação elétrica do circuito encontra-se na Figura 4.

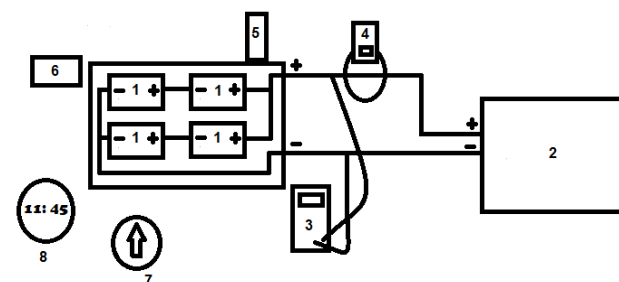


Figura 3. A partir dessa figura é possível verificar o posicionamento da estrutura utilizada para os ensaios experimentais com inclinação do sistema de 35° e um grau de liberdade, que é a condição inicial do sistema (posição fixa).

TABELA 1. Especificação do fabricante da placa

Características Elétricas*	
Descrição	Valor
Potência máxima	120 W ± 5%
Tensão máxima de potência	18 V ± 5%
Torrente máxima de energia	6,6 A ± 5%
Corrente de curto circuito	6,9 A ± 5%
Tensão do circuito aberto	21,6 V ± 5%

Nota\*: Em condições de teste padrão com irradiação de 1000 w/m<sup>2</sup> e temperatura celular de 25°C.



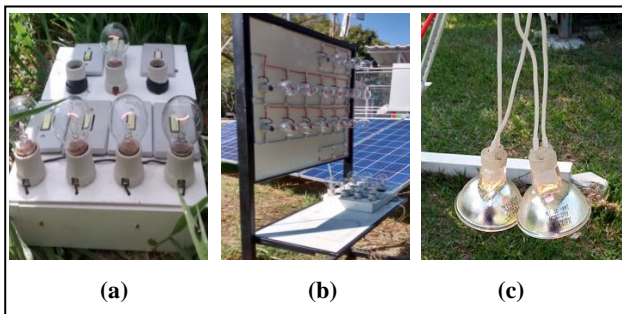
**Legenda:**

- 1 - Painéis fotovoltaicos
- 2 - Célula de carga
- 3 - Multímetro para medição de tensão (V)
- 4 - Amperímetro para medição de corrente (A)
- 5 - Termômetro para medição da temperatura (°C)
- 6 - Pirometro para medição da temperatura (°C)
- 7 - Bússola
- 8 - Relógio

Figura 4. Observa-se o esquema de instalação elétrica do circuito, com os materiais empregados e instrumentos de medição instalados no sistema. A célula de carga do sistema (banco de lâmpadas) teve como objetivo a absorção de energia elétrica gerada pelo sistema. Os aparelhos foram utilizados para coleta de dados experimentais. A temperatura coletada foi a da superfície das placas fotovoltaicas no horário e na posição indicada pela bússola em relação ao norte.

Os dados foram coletados entre os dias 24 de março e 05 de maio de 2020. Os experimentos foram realizados de formas diferentes acompanhando o movimento do sol (Figura 5):

- Teste com intervalos de 15 minutos em cada uma das posições pré-definidas a 15°, 60°, 105°, 150° e 330° em relação ao norte e também uma vez com uma posição fixa à 15° ao norte, com cinco lâmpadas de 100 W/127 V cada.
- Teste com intervalo de 15 minutos em cada posição acompanhando a melhor posição de captação dos raios solares à 245°, 250°, 255°, 260°, 270°, 280°, 290°, 300°, 310°, 315°, 320°, e 330° relação ao norte e também uma posição fixa à 15° ao norte, com 22 lâmpadas de 200 W/220 V cada, e em seguida com 2 duas lâmpadas de 250 W/24 V cada.



**Figura 5.** (a) Conjunto de 5 lâmpadas de 100 W/127 V cada utilizado em parte dos experimentos. As lâmpadas foram instaladas em paralelo nessa célula de carga. (b) Conjunto de 22 lâmpadas de 200 W/220 V cada, com o objetivo de diminuir a resistência do sistema e aumentar o consumo. (c) Conjunto de duas lâmpadas LED de 250 W/ 24 V.

#### IV. RESULTADOS

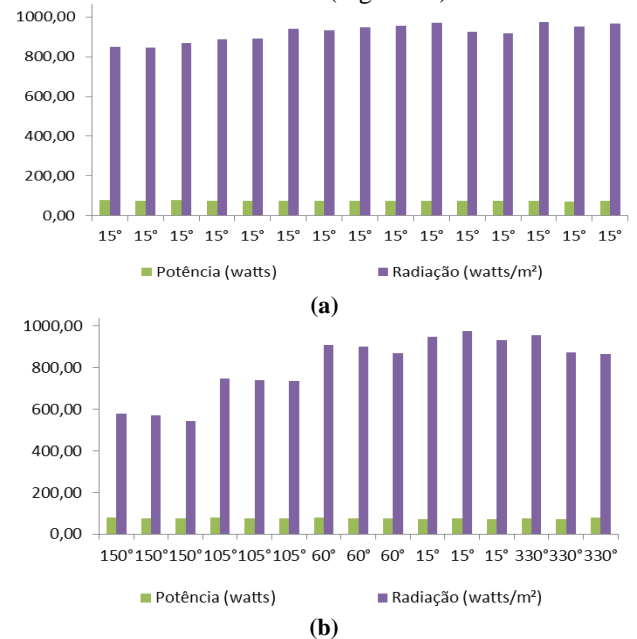
Nas células de carga utilizadas para os experimentos, observa-se que cada circuito foi montado em paralelo, com a corrente calculada conforme o que consta na Tabela 2.

**TABELA 2.** Corrente calculada para os circuitos dos conjuntos de lâmpadas utilizadas nos experimentos.

Conjunto	Nº de lâmpadas	Corrente (A)
5 x 100 W/127 V	1	0,787
	5	3,935
22 x 200 W/220 V	1	0,909
	22	0,909
2 x 250 W/24 V	1	10,410
	2	20,833

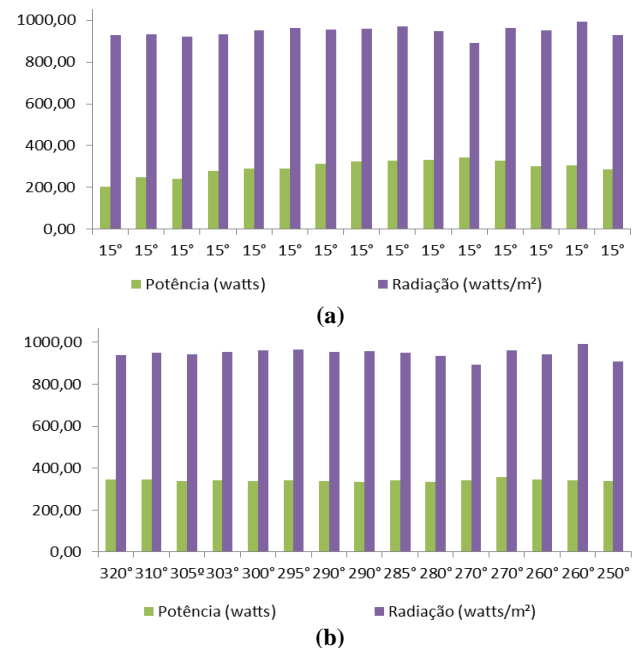
Comparando-se os sistemas fixo e móvel do primeiro experimento, com o conjunto de 5 lâmpadas (Figuras 6a e 6b, respectivamente), verificou-se que a incidência solar sobre os painéis do sistema fixo (Figura 6a) variou entre 800 e 950 W/m<sup>2</sup>. Já o sistema móvel teve maior irradiação nos horários de pico e variou entre 550 e 950 W/m<sup>2</sup>. A

potência do sistema manteve-se estável, tanto na estrutura móvel como na estrutura fixa (Figura 6b).



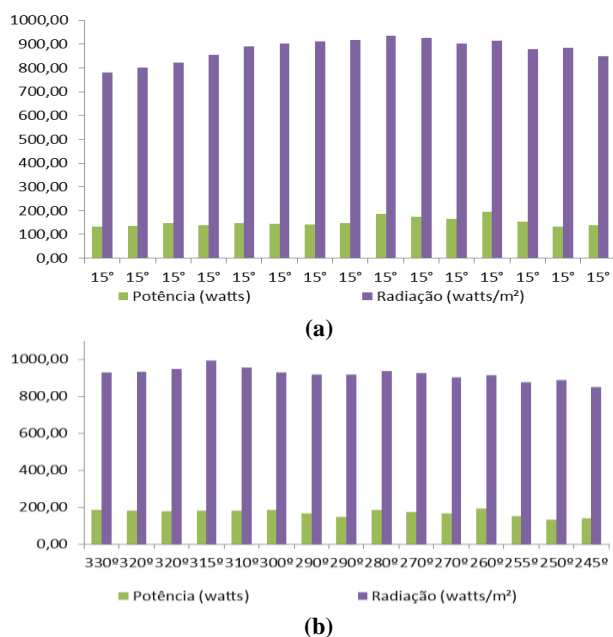
**Figura 6.** Irradiação levantada de forma experimental para o sistema de 5 lâmpadas de 100 W/127 V (a) fixo e o (b) móvel.

Para o conjunto de 22 lâmpadas incandescentes de 200W/220V, obtivemos uma resposta muito próxima entre os dois sistemas, no que se refere à irradiação captada, mas a potência do sistema fixo (Figura 7a) foi menor principalmente no início e no final do dia, quando há menor irradiação. Conclui-se então que, com essa potência mais estável, o sistema móvel foi mais eficiente para captação de irradiação e efetivo para disponibilização de potência.



**Figura 7.** Irradiação levantada de forma experimental para o sistema de 22 lâmpadas de 200 W/220 V (a) fixo e o (b) móvel. Maior potência disponibilizada para o sistema móvel de rastreamento do sol.

Os últimos testes foram com a célula de carga de 2 lâmpadas LED de 250 W/ 24 V (Figura 8), também para os sistemas fixo (Figura 8a) e móvel (Figura 8b).



**Figura 8.** Irradiação levantada de forma experimental para o sistema 2 lâmpadas LED de 250 W/ 24 V (a) fixo e o (b) móvel.

No caso da célula de carga com 2 lâmpadas LED de 250 W/ 24 V, comparou-se o sistema fixo (Figura 8a) com o sistema móvel (Figura 8b) e obteve-se um ganho de 10 a 15% de incidência solar sobre os painéis. De forma similar ao experimento anterior, a irradiação do sistema se manteve entre 880 e 1000 W/m<sup>2</sup>, em ambas as estruturas fixa e móvel, mas a potência do sistema na estrutura móvel foi maior, variando de 100 W a 190 W (Figura 8a). Já no experimento com a estrutura fixa a potência variou de 100 W na maior parte do tempo, e com alguns picos de 150 W, de acordo (Figura 8a).

#### IV. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que houve um melhor aproveitamento dos painéis fotovoltaicos do sistema móvel, no que se refere à disponibilização de potência. A maior potência atingida pelo sistema em uma ótima condição climática, com incidências solares de 1.000 W/m<sup>2</sup> e sem interferências de nuvens e ventos, foi de 365 W, ou seja, 75% do citado nas especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos. Conclui-se então que, a automatização do sistema de painéis fotovoltaicos, do fixo

para móvel para o devido rastreamento do Sol, é viável, pois propicia a otimização da captação de irradiação solar. De acordo com os três experimentos realizados, o ganho de potência disponibilizada foi de 10 a 20% em relação à estrutura fixa, que foi verificado pela célula de carga utilizada em cada um dos experimentos.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Farias, L. M. and Sellitto, M. A. *Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras*, *Liberato* **12**, 7-16 (2011).
- [2] Kurtz, R. et AL, S., *Revisiting the terawatt challenge*, *MRS Bulletin* **45**, 159–164 (2020).
- [3] Tang, R. and Liu, X., *Optical performance and design optimization of V-trough concentrators for photovoltaic application*, *Sol Energy* **85**, 2154–66 (2011).
- [4] Tyagi, V. V., Kaushik, S. C. and Tyagi, S. K., *Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology*, *Renewable Sust. Energy Rev.* **16**, 1383–98 (2012).
- [5] Daghigh, R., Ruslan, M. H. and Sopian, K., *Advances in liquid based photovoltaic/ thermal (PV/T) collectors*, *Renewable Sust. Energy Rev.* **15**, 156–70 (2011).
- [6] Chong, K., Lau, S., Yew, T. and Tan, P., *Design and development in optics of concentrator photovoltaic system*. *Renewable Sust. Energy Rev.* **19**, 598–612 (2013).
- [7] Haroun, R., Aroudi, E., Cid-Pastor, A., Garcia, G., Olalla, C and Martínez-Salamero L., *Impedance Matching in Photovoltaic Systems Using Cascaded Boost Converters and Sliding-Mode Control*, *IEEE Transactions on Power electronics* **30**(6), (2015).
- [8] Nfaoui, M., and El-Hami, K., *Extracting the maximum energy from solar panels*, *Energy Reports* **4**, 536-545 (2018).
- [9] Kahoul, N., Houabes, M. and Neçaibia, A., *A comprehensive simulator for assessing the reliability of a photovoltaic panel peak power tracking system*, (Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015).
- [10] Vieira, R.G., Guerra, F. K. O. M. V., Vale, M. R. B. G., Araújo, M. M., *Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator*. *Renewable Sust. Energy Rev.* **64**, 672-681 (2016).
- [11] Pinto, A. et al., *Descrição de Seguidores Solares e sua Aplicação em Centrais Fotovoltaicas Conectadas à Rede*. In: III Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, Pará, Brasil (2010).
- [12] Oliveira, O. G., Oliveira, R. H. e Gomes, R. O. *Energia solar: um passo para o crescimento*, REGRAD, **10**, 377-389 (2017).
- [13] Castañeda, C. E. F., *Desenvolvimento de um rastreador solar passivo por transferência de massa*, (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-Graduação de Desenvolvimento Tecnológico, Curitiba, Brasil (2011).

[14] Cortez, R. J. M., *Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica*, (Dissertação de Mestrado) Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal (2012).

[15] Cheng, H. Y., Yu, C. C., Hsu, K. C., Chan, C. C., Tseng, M. H. and Lin, C. L., *Estimating solar irradiance on tilted surface with arbitrary orientations and tilt angles*. *Energies* **12**, 1427 (2019).